



Grau en Enginyeria Mecànica

Alumne: Alejandro Domènech Bellés

***Estudi comparatiu entre un quadre de
bicicleta d'acer i un quadre d'alumini***

Director: Albert Catalan Artigas

Convocatòria: Gener 2020

Resum

En aquest estudi, s'ha volgut comparar un quadre d'acer i un d'alumini per a intentar esbrinar quins han estat els motius pels quals, avui dia, s'ha optat per la tria de l'alumini en la fabricació de quadres de bicicleta substituint l'acer en la seva elaboració. El document s'inicia amb un repàs, a nivell històric, de l'evolució de la bicicleta des dels seus inicis fins a l'actualitat. Alhora, s'han descrit les diferents geometries disponibles en els quadres de carretera i els materials emprats en la seva fabricació, destacant-ne les principals característiques. Seguidament s'han especificat les tècniques emprades a l'hora de fabricar els quadres en funció del seu material.

Continuant amb la part pràctica, es presenta el model 3D que s'ha fet servir per a realitzar l'anàlisi pel mètode d'elements finits, es plantegen les hipòtesis que es tenen en compte a l'hora de realitzar els diferents casos i es descriuen les quatre situacions a través de les quals s'ha volgut assajar aquest component juntament amb les càrregues aplicades a cadascuna de les parts del quadre. Un cop finalitzats els anàlisis MEF, realitzats amb el programa *Solidworks*, s'adjunten les gràfiques de tensions, deformacions, desplaçaments i factor de seguretat, per donar pas a documentar els resultats obtinguts. Mitjançant aquests resultats es compara el comportament de cada material sotmès a unes condicions en cadascuna de les situacions descrites per a, finalment, extreure les conclusions i respondre les preguntes plantejades inicialment.

Abstract

This study wants to compare a steel and aluminium frame trying to find out the reasons why, currently, aluminium has been chosen in bicycle frame fabrication replacing steel in its elaboration. The document starts with a historical review of the bicycle evolution from the beginning to the present. At the same time, describes the different available geometries in the road bikes and the materials used in its fabrication, highlighting the main characteristics. After that fabrication techniques have been shown in the elaboration of the frames depending on the material.

Following with the practical part, the document presents a 3D model used in the finite element method analysis, proposes the hypothesis considered in the different cases and describes the four realistic situations in which the 3D model has been tested with the loads applied on the different sections of the frame. Ending with the FEM analysis, made with Solidworks program, stress, deformation, displacement and security factor plots are annexed to document the results. Through these results, we can compare the behaviour of each material submitted to conditions previously described ending with conclusions and answering the initial questions.

Índex de la memòria

Índex d'il·lustracions	6
Índex de taules	9
1. Introducció	11
1.1. Objectiu del estudi	11
1.2. Abast de l'estudi.....	11
1.3. Motivació personal.....	11
1.4. Evolució del producte.....	12
1.4.1. Invenció de la bicicleta i transformació de la societat	12
1.4.2. Evolució de la bicicleta per dècades.....	13
1.5. Estat de l'art	17
1.5.1. Geometria del quadre	17
1.5.2. Materials emprats en el quadre	19
1.5.3. Mètodes de fabricació dels quadres	23
2. Mètode d'anàlisis	29
2.1. Definició	29
2.2. Forma de treball del MEF a la pràctica.....	29
2.2.1. Preprocessat i generació de la malla.....	30
2.2.2. Càlcul i resolució de sistemes d'equacions	30
2.2.3. Post-processat.....	30
2.3. Tipus d'anàlisis d'enginyeria	30
2.3.1. Resultats del MEF	31
2.3.2. MEF d'ordre superior	31
2.3.3. Limitacions	32
2.4. Solidworks Simulation	32
2.4.1. Tipus d'estudi	32
2.4.2. Característiques del mallat.....	34
2.4.3. Mètodes adaptatius	35
3. Definició del estudi.....	36
3.1. Presentació dels dissenys.....	36
3.1.1. Quadre d'acer.....	37
3.1.2. Quadre d'alumini.....	37
3.1.3. Presentació del model 3D	38
3.2. Definició dels paràmetres comparatius i de les hipòtesis.....	39

3.2.1.	Definició dels paràmetres comparatius	39
3.2.2.	Definició de les hipòtesis.....	39
3.3.	Casos d'estudi.....	40
3.3.1.	Cas 1: ciclista assegut pedalant en pla	41
3.3.2.	Cas 2: ciclista assegut pujant una pendent	52
3.3.3.	Cas 3: ciclista pujant una pendent de peu	63
3.3.4.	Cas 4: ciclista pujant una pendent de peu (Cas més desfavorable)	74
4.	Anàlisi dels resultats.....	85
4.1.	Resultats del Cas 1.....	85
4.1.1.	Taula comparativa dels resultats	85
4.1.2.	Gràfiques comparatives entre els dos quadres (Cas 1).....	86
4.2.	Resultats del Cas 2.....	91
4.2.1.	Taula comparativa dels resultats	91
4.2.2.	Gràfiques comparatives entre els dos quadres (Cas 2).....	92
4.3.	Resultats del Cas 3.....	97
4.3.1.	Taula comparativa dels resultats	97
4.3.2.	Gràfiques comparatives entre els dos quadres (Cas 3).....	98
4.4.	Resultats del Cas 4.....	103
4.4.1.	Taula comparativa dels resultats	103
4.4.2.	Gràfiques comparatives entre els dos quadres (Cas 4).....	104
4.5.	Comparativa de les tensions	109
4.5.1.	Comentaris dels resultats.....	109
4.6.	Comparativa dels desplaçaments	110
4.6.1.	Comentaris dels resultats.....	110
4.7.	Comparativa de les deformacions unitàries.....	111
4.7.1.	Comentaris dels resultats.....	111
4.8.	Comparativa del factor de seguretat	112
4.8.1.	Comentaris dels resultats.....	112
4.9.	Comentaris generals dels resultats obtinguts.....	112
5.	Conclusions	113
6.	Bibliografia	114
	Declaració d'honor	116

Índex d'il·lustracions

IL·LUSTRACIÓ 1: LA DRAISIANA. FONT: <i>GOOGLE IMATGES</i> .	14
IL·LUSTRACIÓ 2: BICICLETA DE FINALS DEL 1830. FONT: <i>GOOGLE IMATGES</i> .	14
IL·LUSTRACIÓ 3: FOTO COMPARATIVA DE LES TENDÈNCIES DE LA DÈCADA DEL 1860. FONT: <i>GOOGLE IMATGES</i> .	15
IL·LUSTRACIÓ 4: IMATGE DEL DISSENY PROPÍ DE LES BICICLETES DE LA DÈCADA DEL 1870. FONT: <i>GOOGLE IMATGES</i> .	16
IL·LUSTRACIÓ 5: CARACTERÍSTIQUES GEOMÈTRIQUES D'UN QUADRE TRADICIONAL. FONT: <i>LA BICICLETA ATLAS ILUSTRADO</i> .	18
IL·LUSTRACIÓ 6: CARACTERÍSTIQUES GEOMÈTRIQUES D'UN QUADRE AMB <i>SLOPE</i> . FONT: <i>LA BICICLETA ATLAS ILUSTRADO</i> .	18
IL·LUSTRACIÓ 7: BICICLETA AMB QUADRE AERO. FONT: <i>SPECIALIZED</i> .	19
IL·LUSTRACIÓ 8: CAPACITAT RESISTENT DE LA FIBRA DE CARBONI EN FUNCIÓ DEL SENTIT DELS ESFORÇOS. FONT: <i>LA INGENIERÍA DE LA BICICLETA</i> .	22
IL·LUSTRACIÓ 9: PROCÉS PRODUCTIU DE LES FIBRES DE CARBONI. FONT: <i>LA INGENIERÍA DE LA BICICLETA</i> .	24
IL·LUSTRACIÓ 10: PROCÉS PRODUCTIU <i>FILAMENT WINDING</i> . FONT: <i>LA INGENIERÍA DE LA BICICLETA</i> .	25
IL·LUSTRACIÓ 11: PARTS DE LA SOLDADURA TIG.	27
IL·LUSTRACIÓ 12: QUADRE DE BICICLETA A ANALITZAR.	38
IL·LUSTRACIÓ 13: IMATGE IL·LUSTRATIVA DEL CAS 1 D'ESTUDI. FONT: <i>LA INGENIERÍA DE LA BICICLETA</i> .	41
IL·LUSTRACIÓ 14: APLICACIÓ DE TOTES LES CÀRREGUES AL MODEL 3D (CAS 1).	42
IL·LUSTRACIÓ 15: APLICACIÓ DEL PES A LA PART ESQUERRA DEL MANILLAR (CAS 1).	44
IL·LUSTRACIÓ 16: APLICACIÓ DE LES FORCES A LA PART DRETA DEL MANILLAR (CAS 1).	45
IL·LUSTRACIÓ 17: APLICACIÓ DEL PES AL SEIENT (CAS 1).	46
IL·LUSTRACIÓ 18: APLICACIÓ DE LES FORCES AL TUB DE PEDALIER (CAS 1).	47
IL·LUSTRACIÓ 19: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ACER (CAS 1).	47
IL·LUSTRACIÓ 20: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ACER PUNTERA ESQUERRA I DRETA (CAS 1).	48
IL·LUSTRACIÓ 21: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ALUMINI (CAS 1).	48
IL·LUSTRACIÓ 22: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ALUMINI PUNTERA ESQUERRA I DRETA (CAS 1).	49
IL·LUSTRACIÓ 23: APLICACIÓ DEL MOMENT 1 (CAS 1).	49
IL·LUSTRACIÓ 24: APLICACIÓ DEL MOMENT 2 (CAS 1).	50
IL·LUSTRACIÓ 25: PROPIETATS DEL MALLAT (CAS 1).	50
IL·LUSTRACIÓ 26: MALLAT DEL MODEL 3D (CAS 1).	51
IL·LUSTRACIÓ 27: IMATGE IL·LUSTRATIVA DEL CAS 2 D'ESTUDI. FONT: <i>LA INGENIERÍA DE LA BICICLETA</i> .	52
IL·LUSTRACIÓ 28: APLICACIÓ DE TOTES LES CÀRREGUES AL MODEL 3D (CAS 2).	53
IL·LUSTRACIÓ 29: APLICACIÓ DEL PES A LA PART ESQUERRA DEL MANILLAR (CAS 2).	55
IL·LUSTRACIÓ 30: APLICACIÓ DE LES FORCES A LA PART DRETA DEL MANILLAR (CAS 2).	56
IL·LUSTRACIÓ 31: APLICACIÓ DEL PES AL SEIENT (CAS 2).	57
IL·LUSTRACIÓ 32: APLICACIÓ DE LES FORCES AL TUB DE PEDALIER (CAS 2).	58
IL·LUSTRACIÓ 33: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ACER (CAS 2).	58
IL·LUSTRACIÓ 34: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ACER PUNTERA ESQUERRA I DRETA (CAS 2).	59
IL·LUSTRACIÓ 35: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ALUMINI (CAS 2).	59
IL·LUSTRACIÓ 36: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ALUMINI PUNTERA ESQUERRA I DRETA (CAS 2).	60
IL·LUSTRACIÓ 37: APLICACIÓ DEL MOMENT 1 (CAS 2).	60
IL·LUSTRACIÓ 38: APLICACIÓ DEL MOMENT 2 (CAS 2).	61
IL·LUSTRACIÓ 39: PROPIETATS DEL MALLAT (CAS 2).	61
IL·LUSTRACIÓ 40: MALLAT DEL MODEL 3D (CAS 2).	62
IL·LUSTRACIÓ 41: IMATGE IL·LUSTRATIVA DEL CAS 3 D'ESTUDI. FONT: <i>LA INGENIERÍA DE LA BICICLETA</i> .	63
IL·LUSTRACIÓ 42: APLICACIÓ DE TOTES LES CÀRREGUES AL MODEL 3D (CAS 3).	64
IL·LUSTRACIÓ 43: APLICACIÓ DEL PES A LA PART ESQUERRA DEL MANILLAR (CAS 3).	66
IL·LUSTRACIÓ 44: APLICACIÓ DE LES FORCES A LA PART DRETA DEL MANILLAR (CAS 3).	67
IL·LUSTRACIÓ 45: APLICACIÓ DE LES FORCES AL TUB DE PEDALIER (CAS 3).	68
IL·LUSTRACIÓ 46: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ACER (CAS 3).	69
IL·LUSTRACIÓ 47: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ACER PUNTERA ESQUERRA I DRETA (CAS 3).	69

IL·LUSTRACIÓ 48: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ALUMINI (CAS 3)	70
IL·LUSTRACIÓ 49: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ALUMINI PUNTERA ESQUERRA I DRETA (CAS 3)	70
IL·LUSTRACIÓ 50: APLICACIÓ DEL MOMENT 1 (CAS 3)	71
IL·LUSTRACIÓ 51: APLICACIÓ DEL MOMENT 2 (CAS 3)	71
IL·LUSTRACIÓ 52: PROPIETATS DEL MALLAT (CAS 3)	72
IL·LUSTRACIÓ 53: MALLAT DEL MODEL 3D (CAS 3)	73
IL·LUSTRACIÓ 54: IMATGE IL·LUSTRATIVA DEL CAS 4 D'ESTUDI. FONT: LA INGENIERÍA DE LA BICICLETA.	74
IL·LUSTRACIÓ 55: APLICACIÓ DE TOTES LES CÀRREGUES AL MODEL 3D (CAS 4)	75
IL·LUSTRACIÓ 56: APLICACIÓ DEL PES A LA PART ESQUERRA DEL MANILLAR (CAS 4)	77
IL·LUSTRACIÓ 57: APLICACIÓ DE LES FORCES A LA PART DRETA DEL MANILLAR (CAS 4)	78
IL·LUSTRACIÓ 58: APLICACIÓ DE LES FORCES AL TUB DE PEDALIER (CAS 4)	79
IL·LUSTRACIÓ 59: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ACER (CAS 4)	80
IL·LUSTRACIÓ 60: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ACER PUNTERA ESQUERRA I DRETA (CAS 4)	80
IL·LUSTRACIÓ 61: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ALUMINI (CAS 4)	81
IL·LUSTRACIÓ 62: APLICACIÓ REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ALUMINI PUNTERA ESQUERRA I DRETA (CAS 4)	81
IL·LUSTRACIÓ 63: APLICACIÓ DEL MOMENT 1 (CAS 4)	82
IL·LUSTRACIÓ 64: APLICACIÓ DEL MOMENT 2 (CAS 4)	82
IL·LUSTRACIÓ 65: PROPIETATS DEL MALLAT (CAS 4)	83
IL·LUSTRACIÓ 66: MALLAT DEL MODEL 3D (CAS 4)	84
IL·LUSTRACIÓ 67: GRÀFIC DE TENSIONS AL QUADRE D'ACER (CAS 1)	86
IL·LUSTRACIÓ 68: GRÀFIC DE TENSIONS AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 1)	86
IL·LUSTRACIÓ 69: GRÀFIC DE DESPLAÇAMENTS AL QUADRE D'ACER (CAS 1)	88
IL·LUSTRACIÓ 70: GRÀFIC DE DESPLAÇAMENTS AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 1)	88
IL·LUSTRACIÓ 71: GRÀFIC DE DEFORMACIONS UNITÀRIES AL QUADRE D'ACER (CAS 1)	89
IL·LUSTRACIÓ 72: GRÀFIC DE DEFORMACIONS UNITÀRIES AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 1)	89
IL·LUSTRACIÓ 73: GRÀFIC DE FACTOR DE SEURETAT AL QUADRE D'ACER (CAS 1)	90
IL·LUSTRACIÓ 74: GRÀFIC DE FACTOR DE SEURETAT AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 1)	90
IL·LUSTRACIÓ 75: GRÀFIC DE TENSIONS AL QUADRE D'ACER (CAS 2)	92
IL·LUSTRACIÓ 76: GRÀFIC DE TENSIONS AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 2)	92
IL·LUSTRACIÓ 77: GRÀFIC DE DESPLAÇAMENTS AL QUADRE D'ACER (CAS 2)	94
IL·LUSTRACIÓ 78: GRÀFIC DE DESPLAÇAMENTS AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 2)	94
IL·LUSTRACIÓ 79: GRÀFIC DE DEFORMACIONS UNITÀRIES AL QUADRE D'ACER (CAS 2)	95
IL·LUSTRACIÓ 80: GRÀFIC DE DEFORMACIONS UNITÀRIES AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 2)	95
IL·LUSTRACIÓ 81: GRÀFIC DE FACTOR DE SEURETAT AL QUADRE D'ACER (CAS 2)	96
IL·LUSTRACIÓ 82: GRÀFIC DE FACTOR DE SEURETAT AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 2)	96
IL·LUSTRACIÓ 83: GRÀFIC DE TENSIONS AL QUADRE D'ACER (CAS 3)	98
IL·LUSTRACIÓ 84: GRÀFIC DE TENSIONS AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 3)	98
IL·LUSTRACIÓ 85: GRÀFIC DE DESPLAÇAMENTS AL QUADRE D'ACER (CAS 3)	100
IL·LUSTRACIÓ 86: GRÀFIC DE DESPLAÇAMENTS AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 3)	100
IL·LUSTRACIÓ 87: GRÀFIC DE DEFORMACIONS UNITÀRIES AL QUADRE D'ACER (CAS 3)	101
IL·LUSTRACIÓ 88: GRÀFIC DE DEFORMACIONS UNITÀRIES AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 3)	101
IL·LUSTRACIÓ 89: GRÀFIC DE FACTOR DE SEURETAT AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 3)	102
IL·LUSTRACIÓ 90: GRÀFIC DE FACTOR DE SEURETAT AL QUADRE D'ACER (CAS 3)	102
IL·LUSTRACIÓ 91: GRÀFIC DE TENSIONS AL QUADRE D'ACER (CAS 4)	104
IL·LUSTRACIÓ 92: GRÀFIC DE TENSIONS AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 4)	104
IL·LUSTRACIÓ 93: GRÀFIC DE DESPLAÇAMENTS AL QUADRE D'ACER (CAS 4)	106
IL·LUSTRACIÓ 94: GRÀFIC DE DESPLAÇAMENTS AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 4)	106
IL·LUSTRACIÓ 95: GRÀFIC DE DEFORMACIONS UNITÀRIES AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 4)	107
IL·LUSTRACIÓ 96: GRÀFIC DE DEFORMACIONS UNITÀRIES AL QUADRE D'ACER (CAS 4)	107

IL·LUSTRACIÓ 97: GRÀFIC DE FACTOR DE SEGURETAT AL QUADRE D'ACER (CAS 4)	108
IL·LUSTRACIÓ 98: GRÀFIC DE FACTOR DE SEGURETAT AL QUADRE D'ALUMINI (CAS 4)	108

Índex de taules

TAULA 1: CARACTERÍSTIQUES DE LA DRAISIANA. FONT: <i>EL LIBRO DE LA BICICLETA. LA HISTORIA VISUAL DEFINITIVA</i> .	14
TAULA 2: CARACTERÍSTIQUES BICICLETES DE FINALS DEL 1830. FONT: <i>EL LIBRO DE LA BICICLETA. LA HISTORIA VISUAL DEFINITIVA</i> .	15
TAULA 3: PROPIETATS MECÀNIQUES ACER 4130. FONT: WIKIPEDIA	20
TAULA 4: PROPIETATS MECÀNIQUES DEL ALUMINI 5052-O. FONT: <i>ALACER MAS</i>	21
TAULA 5: PROPIETATS MECÀNIQUES DEL ALUMINI 6061-T6. FONT: <i>ALACER MAS</i>	21
TAULA 6: PROPIETATS MECÀNIQUES DEL ALUMINI 7075-O. FONT: <i>ALACER MAS</i>	21
TAULA 7: DEFINICIÓ DE LES DIFERENTS PROPIETATS MECÀNIQUES DELS MATERIALS A ANALITZAR	37
TAULA 8: PROPIETATS DEL ACER AISI 4130. FONT: <i>SOLIDWORKS</i> .	37
TAULA 9: PROPIETATS DEL ALUMINI 6061-T6. FONT: <i>SOLIDWORKS</i> .	37
TAULA 10: PESOS DELS QUADRES D'ACER I D'ALUMINI	38
TAULA 11: RESUM DE FORCES I PESOS A APLICAR (CAS 1)	42
TAULA 12: RESUM DELS MOMENTS A APLICAR (CAS 1)	43
TAULA 13: RESUM DE LES REACCIONS A APLICAR (CAS 1)	43
TAULA 14: IMATGES DE LES RESTRICCIONS APLICADES AL TUB DE DIRECCIÓ (CAS 1)	43
TAULA 15: IMATGES DE LES RESTRICCIONS APLICADES A LES PUNTERES DEL QUADRE (CAS 1)	44
TAULA 16: PES A LA PART ESQUERRA DEL MANILLAR (CAS 1)	44
TAULA 17: FORCES A LA PART DRETA DEL MANILLAR (CAS 1)	45
TAULA 18: PES APLICAT AL SEIENT (CAS 1)	46
TAULA 19: FORCES AL TUB DE PEDALIER (CAS 1)	46
TAULA 20: REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ACER (CAS 1)	47
TAULA 21: REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ACER (CAS 1)	48
TAULA 22: REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ALUMINI (CAS 1)	48
TAULA 23: REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ALUMINI (CAS 1)	49
TAULA 24: VALOR DEL MOMENT 1 (CAS 1)	49
TAULA 25: VALOR DEL MOMENT 2 (CAS 1)	50
TAULA 26: RESUM DE FORCES I PESOS A APLICAR (CAS 2)	53
TAULA 27: RESUM DELS MOMENTS A APLICAR (CAS 2)	54
TAULA 28: RESUM DE LES REACCIONS A APLICAR (CAS 2)	54
TAULA 29: IMATGES DE LES RESTRICCIONS APLICADES AL TUB DE DIRECCIÓ (CAS 2)	54
TAULA 30: IMATGES DE LES RESTRICCIONS APLICADES A LES PUNTERES DEL QUADRE (CAS 2)	55
TAULA 31: PES A LA PART ESQUERRA DEL MANILLAR (CAS 2)	55
TAULA 32: FORCES A LA PART DRETA DEL MANILLAR (CAS 2)	56
TAULA 33: PES APLICAT AL SEIENT (CAS 2)	57
TAULA 34: FORCES AL TUB DE PEDALIER (CAS 2)	57
TAULA 35: REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ACER (CAS 2)	58
TAULA 36: REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ACER (CAS 2)	59
TAULA 37: REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ALUMINI (CAS 2)	59
TAULA 38: REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ALUMINI (CAS 2)	60
TAULA 39: VALOR DEL MOMENT 1 (CAS 2)	60
TAULA 40: VALOR DEL MOMENT 2 (CAS 2)	61
TAULA 41: RESUM DE FORCES I PESOS A APLICAR (CAS 3)	64
TAULA 42: RESUM DELS MOMENTS A APLICAR (CAS 3)	65
TAULA 43: RESUM DE LES REACCIONS A APLICAR (CAS 3)	65
TAULA 44: IMATGES DE LES RESTRICCIONS APLICADES AL TUB DE DIRECCIÓ (CAS 3)	65
TAULA 45: IMATGES DE LES RESTRICCIONS APLICADES A LES PUNTERES DEL QUADRE (CAS 3)	66
TAULA 46: PES A LA PART ESQUERRA DEL MANILLAR (CAS 3)	66

TAULA 47: FORCES A LA PART DRETA DEL MANILLAR (CAS 3).....	67
TAULA 48: FORCES AL TUB DE PEDALIER (CAS 3)	68
TAULA 49: REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ACER (CAS 3)	69
TAULA 50: REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ACER (CAS 3)	69
TAULA 51: REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ALUMINI (CAS 3)	70
TAULA 52: REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ALUMINI (CAS 3)	70
TAULA 53: VALOR DEL MOMENT 1 (CAS 3)	71
TAULA 54: VALOR DEL MOMENT 2 (CAS 3)	71
TAULA 55: RESUM DE FORCES I PESOS A APLICAR (CAS 4)	75
TAULA 56: RESUM DELS MOMENTS A APLICAR (CAS 4).....	76
TAULA 57: RESUM DE LES REACCIONS A APLICAR (CAS 4)	76
TAULA 58: IMATGES DE LES RESTRICCIONS APLICADES AL TUB DE DIRECCIÓ (CAS 4)	76
TAULA 59: IMATGES DE LES RESTRICCIONS APLICADES A LES PUNTERES DEL QUADRE (CAS 4)	77
TAULA 60: PES A LA PART ESQUERRA DEL MANILLAR (CAS 4)	77
TAULA 61: FORCES A LA PART DRETA DEL MANILLAR (CAS 4).....	78
TAULA 62: FORCES AL TUB DE PEDALIER (CAS 4)	79
TAULA 63: REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ACER (CAS 4)	79
TAULA 64: REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ACER (CAS 4)	80
TAULA 65: REACCIÓ RODA DAVANTERA QUADRE ALUMINI (CAS 4)	80
TAULA 66: REACCIÓ RODA DARRERE QUADRE ALUMINI (CAS 4)	81
TAULA 67: VALOR DEL MOMENT 1 (CAS 4)	82
TAULA 68: VALOR DEL MOMENT 2 (CAS 4)	82
TAULA 69: TAULA COMPARATIVA DE RESULTATS (CAS 1).....	85
TAULA 70: LOCALITZACIÓ TENSIONS MÀXIMES (CAS 1)	87
TAULA 71: TAULA COMPARATIVA DE RESULTATS (CAS 2).....	91
TAULA 72: LOCALITZACIÓ TENSIONS MÀXIMES (CAS 2)	93
TAULA 73: TAULA COMPARATIVA DE RESULTATS (CAS 3).....	97
TAULA 74: LOCALITZACIÓ TENSIONS MÀXIMES (CAS 3)	99
TAULA 75: TAULA COMPARATIVA DE RESULTATS (CAS 4).....	103
TAULA 76: LOCALITZACIÓ TENSIONS MÀXIMES (CAS 4)	105
TAULA 77: COMPARATIVA RESULTATS DE LES TENSIONS.....	109
TAULA 78: COMPARATIVA RESULTATS DELS DESPLAÇAMENTS	110
TAULA 79: COMPARATIVA RESULTATS DE LES DEFORMACIONS UNITÀRIES.....	111
TAULA 80: COMPARATIVA RESULTATS DELS FACTORS DE SEGURETAT.....	112

1. Introducció

1.1. Objectiu del estudi

L'objectiu principal del estudi és fer una comparativa entre dos quadres de bicicleta de carretera reals, un quadre d'acer i un d'alumini. En aquesta comparativa es vol analitzar el comportament d'ambdós quadres sota diferents situacions reals per tal d'observar les diferències en quant al comportament en funció del material emprat. Aquest estudi es porta a terme mitjançant un software que permet realitzar anàlisis pel mètode dels elements finits, concretament Solidworks. Amb aquest software es pretén comparar les tensions, desplaçaments, deformacions i factor de seguretat amb el que treballa el quadre per a cadascun dels casos i materials.

1.2. Abast de l'estudi

L'abast d'aquest estudi queda marcat per una part teòrica i una part pràctica. En la part teòrica s'amplien els coneixements de la bicicleta des d'un punt de vista tècnic, així com situar la bicicleta com a element transformador de la societat i com va a ajudar a evolucionar d'altres sectors industrials. Seguint amb la part teòrica es defineixen les geometries existents en els quadres de bicicleta de carretera, els materials que els conformen, mètodes de fabricació i finalment, la definició del mètode d'elements finits. Com a part pràctica, s'estableixen els quatre casos d'estudi així com les forces i moments presents a cada quadre, s'especifiquen les hipòtesis a tenir en compte a l'hora d'assajar els quadres i, un cop obtinguts els resultats, s'extreuen les conclusions oportunes a partir de les dades dels estudis. Finalment, afegir que en aquest estudi no es realitza cap assaig del model 3D a fatiga. Tampoc es fabrica cap quadre real ni es realitza cap assaig d'un quadre real.

1.3. Motivació personal

Els motius que em van portar a realitzar aquest estudi, van ser a partir d'observar les tendències a nivell de materials en el món de la bicicleta. Em va cridar l'atenció com l'alumini va anar guanyant terreny a l'acer fins que finalment s'ha imposat. Arribats a aquest punt, vaig voler descobrir quins han sigut els motius d'aquesta imposició i treure les conclusions oportunes a través de dades numèriques. A continuació adjunto unes qüestions que em van sorgir a l'hora de realitzar aquest estudi:

- És l'alumini un millor material que l'acer a l'hora de fabricar els quadres de bicicleta?
- Té l'alumini un millor comportament que l'acer?
- És degut a una qüestió de pes?

L'objectiu és que a partir de l'elaboració d'aquest treball pugui respondre aquestes i d'altres qüestions que vagin sorgint.

1.4. Evolució del producte

En aquest apartat, es fa un repàs de l'evolució de la bicicleta amb el pas dels anys, des de la seva creació a mitjans del segle XIX fins a l'actualitat. Aquest punt no es centra només en el quadre, sinó en la bicicleta com a conjunt i de com aquesta va ser un fenomen transformador de la societat tal i com la coneixem actualment.

1.4.1. Invenció de la bicicleta i transformació de la societat

L'any 1817, l'inventor Karl Von Drais va crear la primera bicicleta coneguda amb el nom de Draisiana, en honor al seu creador. La Draisiana va ser el primer vehicle de tracció humana amb dues rodes disposades en línia. El moviment es feia a través de la força humana, on la persona que hi anava al damunt havia d'empènyer l'objecte per a poder avançar, tal i com funcionen les anomenades pre-bicicletes, les bicicletes infantils que no compten amb pedals. El motiu d'aquesta elecció, segons el seu creador, va ser que segons ell la gent es mostrà reticent a aixecar els peus del terra. Això va provocar que no es poguessin aconseguir velocitats de propulsió més altes. Van haver de passar uns 50 anys per a que la gent s'acostumés a aquest objecte i estigués suficientment confiada per a aixecar els peus del terra i situar-los sobre un pedals. Els pedals es van generalitzar cap a l'any 1864 coincidint amb la moda del patinatge en pista als EEUU i d'altres països.

Un cop la bicicleta es va normalitzar i dominar, es va convertir amb un símbol de llibertat ja que va donar la opció a viatjar de forma més ràpida que a peu i a explorar nous emplaçaments. A inicis del segle XX, clubs ciclistes francesos van inventar un sistema de rutes que travessaven tota França. Ciclistes pioners de tot el món van augmentar les distàncies recorregudes arribant fins i tot a àrees perilloses per les que la gent d'occident difícilment s'hi atrevia a passar. Aquest fet queda demostrat en que la primera volta al món sobre terra ferma es va fer sobre una bicicleta. Avui dia, aquesta moda està força més estesa i cada cop més ciclistes ho intenten. Actualment, però, el que s'intenta aconseguir és reduir el temps en que s'aconsegueix aquesta fita.

Cap a finals de la dècada dels 1890, el cost d'aquest objecte es va fer més accessible a la gent i això va provocar que els treballadors de fàbriques i oficines utilitzessin la bicicleta com a mètode de transport ràpid per moure's de casa a la feina. Aquest fet va permetre que la gent pogués començar a viure en zones millor condicionades i menys contaminades per la indústria

als afores de les ciutats. La bicicleta també va ser utilitzada com una eina de distribució de béns, com per exemple el correu. També va permetre que els metges poguessin desplaçar-se d'una forma més ràpida i eficaç per atendre els malalts a domicili. D'altres oficis com per exemple bombers, policia i exèrcit van fer us de la bicicleta fins que l'ús de cotxes i furgonetes va ser més adients per a executar millor la seva feina.

La bicicleta, després de la màquina de cosir, va ser la segona màquina complexa en arribar a les llars de finals del segle XIX. Aquest fet va provocar que cada cop més gent comencés a aprendre sobre mecànica i com fer-ne el manteniment d'aquest aparell. A part d'això, l'arribada de la bicicleta, va servir com a camp de proves interactiu per a la indústria automobilística. Un exemple d'això va ser el pneumàtic, on els fabricants de bicicletes el van reinventar després de dècades on els fabricants de cotxes no van aconseguir veure'n el potencial. A part de reinventar components similars als que es poden trobar en ambdós màquines, l'evolució de la bicicleta va impulsar i millorar les tècniques de fabricació de tubs d'acer lleuger, soldadures i aleacions, la tecnologia del acer premsat i el canvi de marxas. Per tant, no sembla casualitat que molts dels fabricants d'automòbils procedien de la manufactura de bicicletes. A part d'innovacions o millores en les tècniques de fabricació de les bicicletes, l'expansió d'aquest objecte va impulsar la millora de les carreteres per a poder-hi circular d'una forma més segura i còmoda.

“Cap innovació tecnològica anterior –ni el motor de combustió interna- fou tant rellevant per al desenvolupament del automòbil com la bicicleta”

James J. Flink- Historiador del automòbil.

1.4.2. Evolució de la bicicleta per dècades

Un cop explicat com l'arribada de la bicicleta va transformar la societat de l'època, es posen exemples gràfics de com ha evolucionat aquest objecte per dècades, posant atenció als canvis que s'anaven realitzant des d'un punt de vista de geometria i dels materials emprats, fins a parlar de transmissions i el diàmetre de les rodes, amb l'objectiu de documentar-ne l'evolució i les innovacions que s'anaven aconseguint per a millorar aquest objecte.

1.4.2.1. Naixement de la bicicleta, 1817

La Draisiana, va ser la primera bicicleta que va tenir èxit comercial, de la qual se'n van fabricar milers d'unitats a Europa. Aquest objecte va néixer amb l'objectiu de reduir la dependència dels cavalls, ja que es venia d'uns mals anys de collita i el farratge per alimentar als animals era escàs. Com a primera gran fita, el seu creador, l'inventor alemany Karl Von Drais, va aconseguir recórrer sobre aquest objecte 13 km en menys d'una hora.



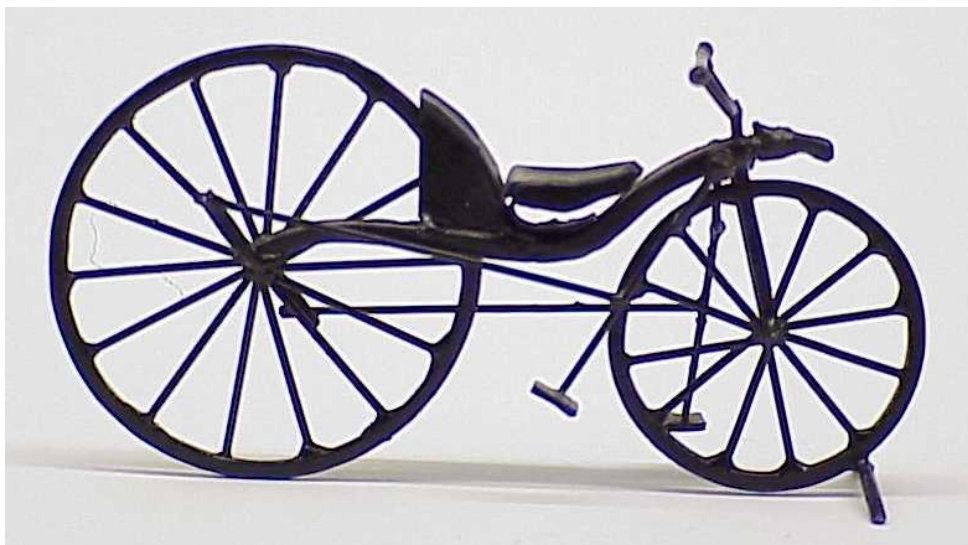
Il·lustració 1: La Draisiana. Font: *Google imatges*.

La Draisiana: Característiques		
Origen	Alemanya	
Material del Quadre	Fusta	
Transmissió	Monomarxa	
Rodes	Ø roda davantera	600 mm
	Ø roda posterior	750 mm

Taula 1: característiques de la Draisiana. Font: *El libro de la bicicleta. La historia visual definitiva*.

1.4.2.2. Finals de la dècada dels 1830

L'any 1839, es reconeix com l'any en que va arribar la primera bicicleta de propulsió de la roda del darrere. El creador, se sol atribuir al ferrer Kirkpatrick Macmillan. Macmillan va construir una d'aquestes bicicletes utilitzant rodes de fusta sense pneumàtic. La roda davantera es limitava a la direcció i la roda del darrere, que era la de major diàmetre, era impulsada per manovelles connectades als pedals per bieles.



Il·lustració 2: Bicicleta de finals del 1830. Font: *Google imatges*.

Característiques de les bicicletes de finals del 1830		
Origen	Regne Unit	
Material del Quadre	Fusta	
Transmissió	Monomarxa	
Rodes	Ø roda davantera	750 mm
	Ø roda posterior	1020 mm

Taula 2: característiques bicicletes de finals del 1830. Font: El libro de la bicicleta. La historia visual definitiva.

1.4.2.3. Dècada del 1860

Cap a la meitat d'aquesta dècada (1865), hi van haver una sèrie de canvis que van marcar una tendència a l'hora d'innovar aquest objecte. Alguns d'aquests canvis van ser:

- Material del quadre: es va passar d'utilitzar fusta com a principal material del quadre a utilitzar quadres de ferro o ferro forjat.
- Transmissió: es va passar de les manovelles per a moure la roda del darrere a utilitzar pedals muntats sobre bieles situades a la roda davantera. En aquesta dècada encara es va mantenir la marxa única.
- Rodes: en aquesta dècada hi van haver dos vessants en aquest aspecte.
 - Rodes fabricades íntegrament de fusta.
 - Rodes de fusta muntades sobre llantes d'acer.
 - En termes del diàmetre, la roda davantera va passar a ser la roda de major diàmetre amb l'objectiu de millorar la velocitat i el confort del ciclista.

La imatge que apareix a continuació il·lustra la tendència que es va seguir en aquesta dècada. Cada fabricant prenia les seves decisions però les similituds eren moltes.



Il·lustració 3: foto comparativa de les tendències de la dècada del 1860. Font: Google imatges.

1.4.2.4. Dècada del 1870

La dècada del 1870 va estar marcada pels diversos avenços en la metal·lúrgia, entre ells els tubs buits d'acer per als quadres i rodes amb els radis de filferro. Un altre dels avenços va ser el diàmetre creixent de les rodes impulsores, concretament la roda davantera, que permetia rodar més suaument i recórrer una major distància amb cada revolució dels pedals. En aquesta dècada, a nivell de rodes, van aparèixer les rodes de coberta massissa de cautxú, substituint així les anteriors rodes de fusta.

A continuació es pot observar una imatge de la tendència en el disseny que van adoptar les bicicletes d'aquesta dècada.



Il·lustració 4: imatge del disseny propi de les bicicletes de la dècada del 1870. Font: *Google imatges*.

1.4.2.5. Període comprés entre les dècades 1900 fins al 1980

Les tendències que es van consolidar durant aquest període de 80 anys van ser:

- Materials: fiançament dels quadres d'acer.
- Transmissió: passa d'estar situada a la roda davantera a situar-se a la roda del posterior. La posició dels pedals s'estableix al centre de la bicicleta, entre les dues rodes.
- Rodes: s'unifiquen els diàmetres de les rodes.
- Pneumàtics: passen de ser massissos de Cautxú a pneumàtics amb càmera d'aire.

- Geometria: s'assimilen molt més a les geometries que podem trobar a les bicicletes actuals.
- Transmissió: el número de marxes varia entre 1 i 12 relacions, segons la gamma i l'ús de cada bicicleta.

1.4.2.6. *Període comprés entre les dècades 1980 fins als 2000*

- Materials: hi conviuen 3 tipus de materials: Acer, Alumini i Fibra de Carboni, els 2 últims materials però, no es va establir fins a mitjans de la dècada dels 90. Durant aquest període de temps comencen a aparèixer les primeres aleacions i combinacions de materials, com per exemple, l'Aleació d'alumini i magnesi.
- Transmissió: hi ha un canvi substancial respecte a l'anterior període. En aquest interval de temps, el número de relacions anava entre 1 i 24 depenent de la gamma de bicicleta i la funció per a la qual estava dissenyada.

1.4.2.7. *Període comprés entre els 2000 i l'actualitat*

- Materials: s'imposen els quadres d'alumini i fibra de carboni. Els quadres de fibra de carboni, queden reservats per a les bicicletes de gamma més alta, els quadres d'alumini per a les gammes mitjanes i els quadres d'acer queden relegats a bicicletes més concretes o de gamma baixa.
- Transmissió: el número de relacions es veu incrementat fins a les 30 marxes.

1.5. Estat de l'art

Un cop explicada l'evolució de la bicicleta des dels inicis fins a l'actualitat, aquest apartat es centra en l'objecte d'estudi d'aquest treball, el quadre. L'objectiu d'aquest apartat és anar d'allò més general fins a allò més concret, parlant de les diferents geometries que podem trobar en els quadres, materials utilitzats i els mètodes de fabricació emprats segons els materials utilitzats.

1.5.1. Geometria del quadre

Actualment en les bicicletes de carretera, només trobem dos tipus diferents de geometria: els quadres amb el denominat *slope* i els quadres tradicionals o sense *slope*.

- Quadres tradicionals: en aquests quadres, la barra superior del quadre és totalment horitzontal respecte al terra. Apostant per aquesta geometria, la bicicleta és més estable i còmoda per a llargues distàncies i recorreguts sense complicacions. Aquests tipus de quadres els trobem en bicicletes de cicloturisme o en bicicletes de carretera

d'ús recreatiu. A continuació es pot trobar una il·lustració per a fer més entenedora l'explicació d'un quadre tradicional.



Il·lustració 5: característiques geomètriques d'un quadre tradicional. Font: *La Bicicleta Atlas Ilustrado*.

- Quadre amb *Slopping*: en aquests quadres, la barra superior del quadre es troba inclinada. Aquesta barra, va en caiguda des de el tub de direcció fins al tub on s'allotja el seient. Optant per aquesta geometria procedent de les mountain bike, permet fabricar un quadre més compacte i reduït, produint així, una major rigidesa i maniobrabilitat amb un pes inferior. Aquest concepte l'han adoptat la majoria de fabricants, on l'única diferència existent és en l'agressivitat dels angles. A continuació, es pot veure una il·lustració per a fer més entenedores les característiques d'aquesta geometria.



Il·lustració 6: característiques geomètriques d'un quadre amb *Slope*. Font: *La Bicicleta Atlas Ilustrado*.

Dins d'aquest grup, destaca una geometria amb *Slope* més aerodinàmica. A continuació se n'expliquen més detalls.

- Quadre aero: es caracteritzen per ser quadres molt rígids per a poder transmetre millor la força. A nivell visual, aquests quadres destaquen per utilitzar tubs amb formes especials, normalment ovalats, amb l'objectiu de millorar la resistència al aire. A nivell de sensacions, aquests quadres no estan dissenyats per al confort ja que són poc absorbents. Els usos que se li donen a aquests quadres són per a bicicletes de proves curtes, com contrarellotges o bé per a proves especials, com triatlons. Aquesta geometria afavoreix a que la postura sigui ajupida i avançada sobre la bicicleta. A continuació, s'adjunta una imatge per a fer més entenedores les característiques d'aquests quadres.



Il·lustració 7: bicicleta amb quadre aero. Font: Specialized.

1.5.2. Materials emprats en el quadre

En aquest apartat es defineixen els materials més emprats en la construcció de quadres de bicicleta, així com detallar-ne les propietats i característiques principals de cadascun d'ells i, també, es fa esment de materials menys utilitzats però que compten amb unes propietats que el fan especial.

1.5.2.1. Acer

L'Acer és una barreja de ferro amb una quantitat de Carboni inferior al 2%. Amb aquesta aleació se li proporciona una major duresa al ferro i, per tant, s'aconsegueix alleugerar l'estructura de la bicicleta, ja que es necessita menys material per a suportar la mateixa càrrega de treball. A part del Carboni, se'n poden fer altres aleacions sumant a l'acer alumini, crom, níquel, etc. Cadascuna d'aquestes aleacions proporcionen unes característiques diferents, com per exemple resistència mecànica, duresa o resistència al desgast, entre d'altres.

A continuació es detalla l'aleació d'acer més utilitzada en els quadres de bicicleta:

- **Acer al Crom-Molibdè (Chromoly)**

Aquesta aleació correspon a la família del Acer 4100. Aquests acers, pertanyen a la família dels acers microaleats d'alta resistència i de baixa aleació. Els elements aliats són el Crom i el Molibdè (Cr[0,4 – 1,2 %], Mo [0,08 – 0,25%]). Les característiques principals d'aquesta aleació són la seva excel·lent força en relació al seu pes, la facilitat de soldadura i són considerablement més durs i forts que l'estàndard 1020 d'acer. Algunes de les avantatges d'aquesta aleació són la seva resistència a la tracció i ductilitat. Com a inconvenients tindriem el seu pes i la poca resistència a la corrosió.

A continuació es detallen algunes de les propietats mecàniques del Acer 4130.

Propietats mecàniques del Acer 4130			
Obtenció	Tensió ruptura	Límit elàstic	Duresa (Rockwell)
Obtinguts en Fred	590-760 MPa	480-590 MPa	B 90-96

Taula 3: Propietats mecàniques Acer 4130. Font: Wikipedia

1.5.2.2. Alumini

L'Alumini és un metall no ferromagnètic molt abundant a la terra, ja que s'extreu d'un mineral molt abundant anomenat Bauxita. Per a obtenir aquest material, en primer lloc es fa una transformació de la Bauxita en Alumina per a posteriorment convertir-lo en Alumini mitjançant electròlisi. En estat pur, és un material tou i mal·leable, per això, es fa ús d'aleacions per a fabricar-ne els quadres de les bicicletes.

A l'hora de definir les característiques dels quadres d'Alumini són que les soldadures que uneixen els tubs són visibles i, també, es caracteritzen per absorbir malament les vibracions que es transmeten a través de les rodes.

Les sèries més emprades a l'hora de fabricar els quadres de bicicleta són:

- **Sèrie 5000: Aleació d'Alumini i Magnesi**

Dins de la sèrie 5000 trobem l'Alumini 5052-O. Com a característiques principals tenim la seva bona soldabilitat, bona resistència a la corrosió en ambients marins i una duresa mitja - alta al deformar-se. Com a punt negatiu tindriem la seva baixa capacitat de treballar en fred. A continuació, es mostren les propietats més destacades d'aquesta aleació.

Propietats mecàniques de l'Alumini 5052-O			
Obtenció	Tensió ruptura	Límit elàstic	Duresa (BRINELL)
Recuit	195 MPa	90 MPa	50 HB

Taula 4: Propietats mecàniques del Alumini 5052-O. FONT: Alacer Mas

- **Sèrie 6000: Aleació d'Alumini amb Silici i Magnesi**

Dins d'aquesta sèrie, un dels Aluminis més emprats a l'hora de fabricar els quadres és el 6061-T6. Tal i com indica el títol d'aquest apartat, els elements aliats són el Silici i el Magnesi. L'Alumini 6061, té unes bones propietats mecàniques, resistència a la corrosió i bona soldabilitat. La versió T6 d'aquest material, és la forma trempada. Gràcies a aquest trempat, es permet millorar la resistència a la tracció i el seu límit elàstic. A continuació, es mostren algunes de les propietats mecàniques del Alumini 6061-T6.

Propietats mecàniques de l'Alumini 6061-T6			
Obtenció	Tensió ruptura	Límit elàstic	Duresa (BRINELL)
SOLUCIÓ CALENTA + MADURACIÓ ARTIFICIAL	310 MPa	241 MPa	95 HB

Taula 5: Propietats mecàniques del Alumini 6061-T6. FONT: Alacer Mas

- **Sèrie 7000: Aleació d'Alumini i Zinc**

Dins de la sèrie 7000, una de les aleacions més utilitzats és l'Alumini 7075-O. Les propietats principals d'aquesta aleació són la seva bona ductilitat, bona resistència a la fatiga, força i duresa. A continuació es mostren algunes de les propietats mecàniques del Alumini 7075-O.

Propietats mecàniques de l'Alumini 7075-O			
Obtenció	Tensió ruptura	Límit elàstic	Duresa (BRINELL)
Recuit	225 MPa	105 MPa	60 HB

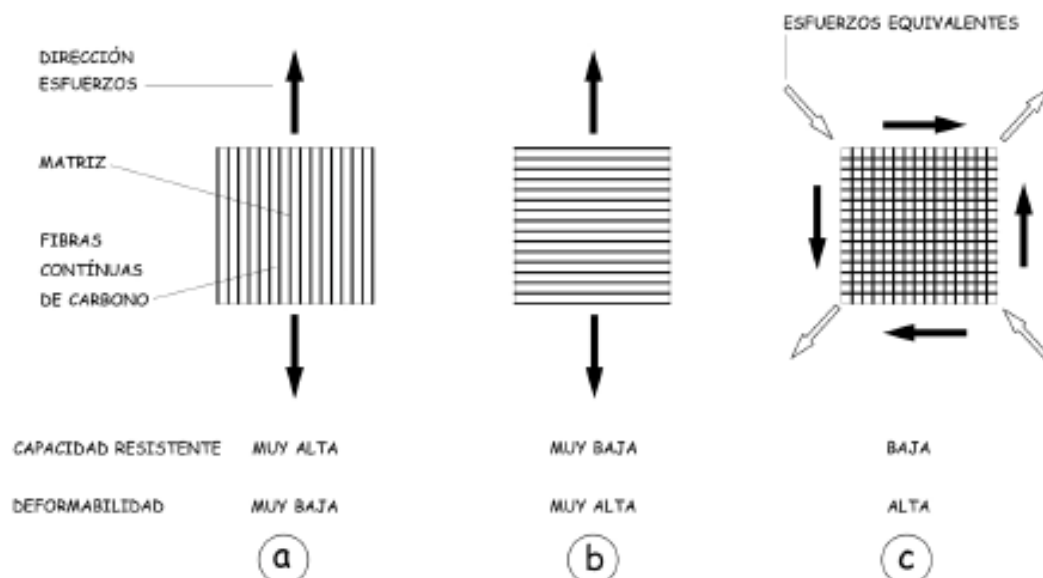
Taula 6: Propietats mecàniques del Alumini 7075-O. FONT: Alacer Mas

1.5.2.3. Fibra de Carboni

Aquest material és un dels més utilitzats actualment en els quadres de les bicicletes de carretera. El carboni és un element químic bàsic del qual se'n coneixen infinitat de composicions, fins i tot forma part de tots els éssers vius. A l'hora de fabricar els quadres de bicicleta, el que s'utilitza és la Fibra de Carboni, una fibra sintètica que com a principal compost té el Carboni. Entrellaçant aquestes fibres amb polímers termotables com l'epoxi, s'aconsegueixen materials compostos anomenats *composites*, amb característiques mecàniques similars al acer però molt més lleugers. Segons els valors de resistència de la fibra, els composites utilitzats es classifiquen en:

- Alta Resistència (HR)
- Mòdul Intermig (IM)
- Alt Mòdul (HM)
- Molt Alt Mòdul (VHM)

Els diferents tubs del quadre es poden fabricar amb combinacions de fibra de carboni de diferent resistència. A part de combinar fibres de diferent resistència, els fabricants juguen amb les orientacions de les fibres per tal de millorar-ne les propietats mecàniques del quadre. A continuació, s'adjunta una imatge on es pot apreciar la resistència de les fibres en funció del sentit dels esforços.



Il·lustració 8: capacitat resistent de la Fibra de carboni en funció del sentit dels esforços. Font: *La ingeniería de la bicicleta*

Algunes de les característiques principals dels quadres fabricats amb aquest material és que es fabriquen d'una peça (monobloc) i que, per tant, no tenen cap tipus de soldadura. Alhora, els quadres de fibra de carboni tenen bona absorció de les vibracions transmeses a través de les rodes.

1.5.2.4. Titani

Aquest material, fora del àmbit de les bicicletes, ha esdevingut indispensable en les indústries aeronàutica i aeroespacial. Al ser biològicament compatible amb teixits i ossos humans, el material pot ser utilitzat en la preparació de pròtesis dentals i ossos.

Tornant al camp de les bicicletes, aquest material es pot trobar present en els pinyons i cargoleria diversa. El seu ús en quadres, queda reservat al Titani aleat.

Les característiques principals dels quadres fabricats amb Titani son:

- Alta resistència

En estat aliat, el Titani poc arribar a assolir unes tensions límit de 1000 N/mm^2 .

- Baixa densitat

Tot i ser un material amb certes propietats que s'assimilen a l'Acer, en termes de densitat, el Titani es situa en els $4,5 \text{ kg/dm}^3$ mentre que l'Acer es situa al voltant dels $7,8 \text{ kg/dm}^3$. Per tant, a grans trets, la densitat del Titani és aproximadament la meitat que la densitat del Acer i, per tant, aquesta característica té una afectació directa en el pes del quadre.

- Excel·lent resistència a la fatiga.

L'aleació de Titani $3\text{Al}/2.5\text{V}$, molt utilitzada per a fabricar els tubs del quadre de les bicicletes, compta amb una tensió límit de fatiga de 310 MPa .

- Excel·lent resistència a la corrosió

El Titani en el seu estat primari és resistent a la corrosió, no necessita cap tipus de tractament ni de pintat. Tot i això, el seu ús en quadres de bicicleta és en estat aleat per a millorar-ne, encara més, les seves propietats mecàniques.

1.5.3. Mètodes de fabricació dels quadres

En aquest apartat es presentem les tècniques que s'utilitzen a l'hora de fabricar els quadres de bicicleta en funció de quin sigui el material utilitzat. Dels materials anteriorment mencionats, existeixen dos mètodes de fabricació:

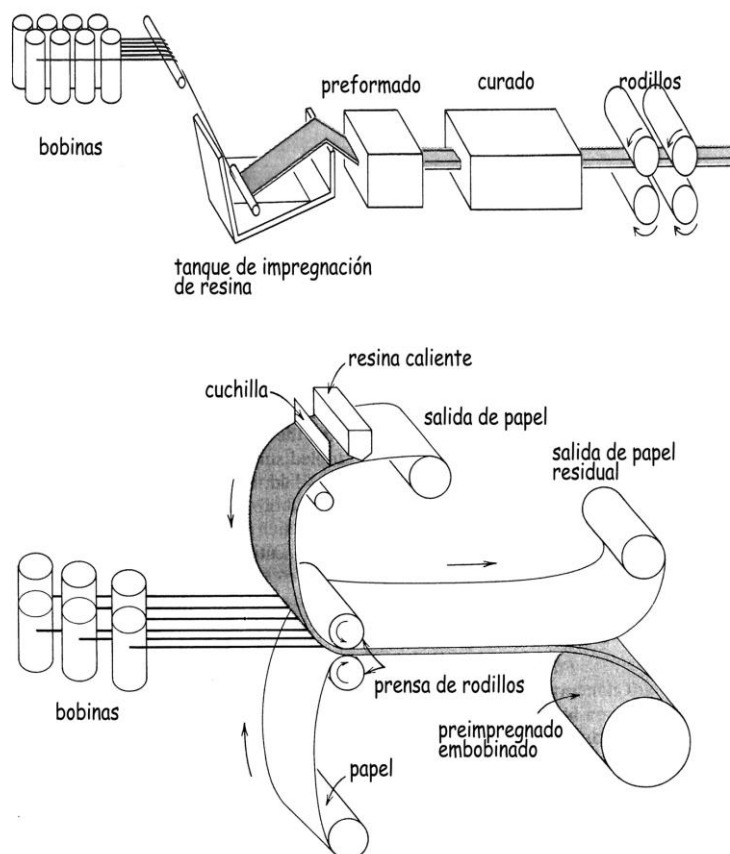
- 1) Fabricació del quadre monobloc, és a dir, el quadre és una única peça.
- 2) Fabricació del quadre mitjançant soldadura.

Un cop definits els dos grans mètodes de fabricació dels quadres, s'especifiquen les tècniques utilitzades en funció del material.

1.5.3.1. Mètode de fabricació dels quadres de Fibra de Carboni

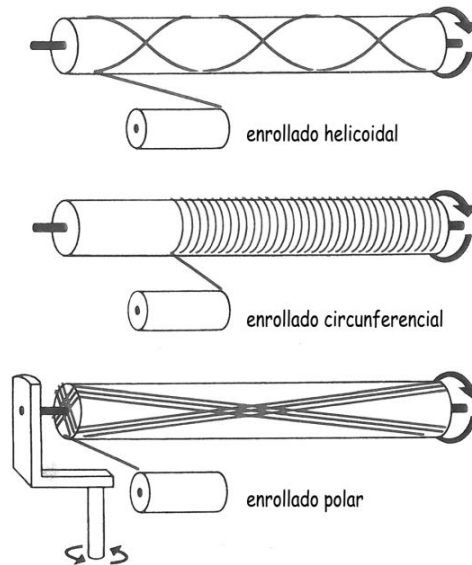
Per a poder fabricar els quadres amb aquest material, en primer lloc es produeixen les capes de material compost. Per a produir aquestes capes, s'han desenvolupat diversos sistemes.

En el procediment denominat Pultrusió, les fibres de carboni que provenen d'un conjunt de bobines d'eix vertical, passen per un bany i, posteriorment, per unes càmeres de preformat i de curat. A continuació, les fibres de carboni s'incorporen a bandes de paper que s'impregnen de resina després de passar per uns rodets calents.



Il·lustració 9: procés productiu de les fibres de Carboni. Font: La ingeniería de la Bicicleta

A l'hora de fabricar tubs de fibra de Carboni, s'utilitza el sistema denominat *filament winding* que permet embolicar les fibres de Carboni amb diverses geometries en funció del esforç que es necessiti suportar.



Il·lustració 10: procés productiu *filament winding*. Font: *La ingeniería de la Bicicleta*

Un cop definit de forma breu el procés productiu de les fibres de Carboni i dels tubs, es presenten els passos que es segueixen a l'hora de fabricar els quadres de bicicleta.

- 1) Un cop obtingudes les fibres amb l'orientació corresponent, s'enganxen les làmines de fibra de carboni a un motllo en positiu d'escuma EPS del quadre. Els tubs emprats en els motllos tenen unes dimensions molt precises i les superfícies interiors no tenen cap rugositat.
- 2) Les juntes del quadre són fabricades amb uns nuclis de silicona i poliuretà que s'utilitza com a motllo ja que les baines del quadre no es poden obtenir al mateix moment que el triangle principal del quadre.
- 3) Arribats a aquest punt, s'embolcalla la totalitat de les superfícies que conformen el quadre i les juntes. Tant el quadre com les juntes s'introdueixen dins d'uns motllos en negatiu i es sotmeten a altes temperatures i pressió, provocant així la compressió de les fibres i l'expulsió de l'excés de resina epoxi que hi pugui haver a través dels orificis de drenatge del motllo i condensa el material compost.

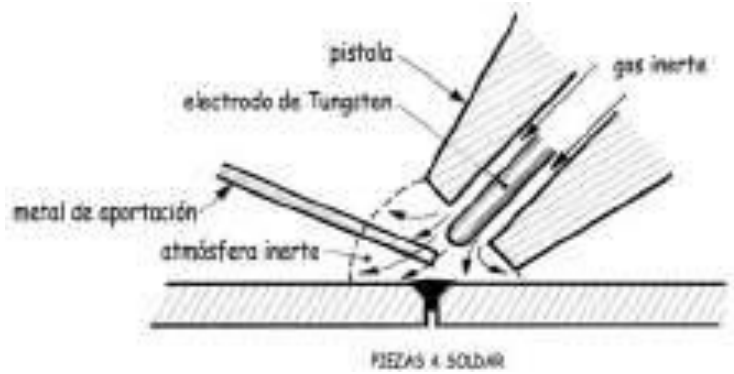
- 4) Un cop endurides les làmines, s'obre el motllo i comença el tractament de les superfícies. Aquestes superfícies han de quedar lliures d'epoxi abans d'introduir les parts d'alumini emprades per a unir les juntes del quadre comprimides a part.
- 5) Un cop llimades les superfícies, es passa a mecanitzar totes les juntes mitjançant màquines de CNC per assegurar-ne la màxima precisió i la correcta alineació entre peces.
- 6) Un cop assemblet el quadre completament, es realitza un polit a mà de tot el quadre i es procedeix al pintat.
- 7) Finalment, un cop aplicades les capes de pintura corresponents s'aplica un envernissat final.

1.5.3.2. Mètode de fabricació dels quadres d'Acer, Alumini i Titani

A l'hora de fabricar els quadres d'Acer, Alumini i Titani, s'utilitza el mateix tipus de soldadura, la soldadura TIG (Tungsten Inert Gas). Tot i utilitzar-se la mateixa tècnica de soldadura, en funció del material a soldar canvien certs paràmetres mencionats a continuació.

En primer lloc es defineix en què consisteix la soldadura TIG. La soldadura TIG es caracteritza per l'ús d'un elèctrode permanent de Tungstè aleat amb Tori o Zircó en percentatges no superiors al 2%. Un tret característic d'aquest tipus de soldadura és l'ús de gasos de protecció del arc de soldadura, normalment s'empren l'Argó o l'Heli o bé una barreja d'ambdós gasos.

La gran avantatge d'aquest mètode de soldadura és l'obtenció de cordons de soldadura més resistents, més dúctils i menys sensibles a la corrosió que la resta de mètodes, ja que el gas protector impedeix el contacte entre l'oxigen de l'atmosfera i el bany de fusió. A més, el gas anteriorment mencionat simplifica la soldadura de metalls ferrosos i no ferrosos ja que no requereix l'ús de desoxidants, amb les deformacions o inclusions d'impureses que pot implicar. Una altra de les avantatges és que permet obtenir soldadures netes i uniformes degut a l'escassetat de fums i projeccions. La mobilitat del gas que envolta l'arc transparent permet al soldador veure clarament allò que està fent en tot moment, fet que repercuteix favorablement en la qualitat de la soldadura. El cordó obtingut és, per tant, de bon acabat superficial que, fins i tot, pot ser millorat amb senzilles operacions d'acabat que repercuteix favorablement en els costos de producció. A més, les deformacions que es produeixen en les immediacions del cordó de soldadura són menors.



Il·lustració 11: parts de la soldadura TIG

Com a inconvenients d'aquesta tècnica de soldadura, tenim:

- Necessitat de proporcionar un flux continu de gas i, per tant, la instal·lació de canonades, bombones, etc.
- Aquesta tècnica de soldadura requereix mà d'obra molt especialitzada, el que fa augmentar els costos.

Tot i emprar-se la mateixa tècnica de soldadura per a la fabricació de quadres d'Acer, Alumini i Titani, hi ha certs paràmetres que canvien en funció del material a soldar. A continuació se'n detallen algunes de les singularitats:

- Quadres d'Acer: degut a les propietats del material, no es requereixen grans consideracions referents a la fusió del material. La soldadura del acer s'ha de realitzar amb corrent continua.
- Quadres d'Alumini: a l'hora de soldar aquest material, s'hauran de tenir en compte les següents consideracions:
 - El punt de fusió del material és inferior als 650°C i no presenta canvis en el color abans de fondre's. Per aquest motiu no podem saber quan el material està calent o llest per a fondre's.
 - L'òxid que es forma molt ràpidament té un punt de fusió 3 cops superior al punt de fusió del material, superior als 1700°C. Aquest òxid és més pesat que l'Alumini i quan es fon tendeix a quedar atrapat a l'Alumini fos.
 - Com a complicació afegida, el punt d'ebullició del Alumini pur és d'Aproximadament 1600°C, és a dir, bull a una temperatura inferior a la que es fon l'òxid.

Per els motius anteriorment mencionats, la neteja de les soldadures mitjançant un raspall de llautó esdevé de gran importància, ja que podem raspar la superfície soldada i netejar les restes d'òxid.

La soldadura TIG per als quadres d'Alumini s'ha de realitzar amb corrent alterna.

- Quadres de Titani: a l'hora de fabricar els quadres de Titani, el principal factor a evitar és l'aparició d'òxid de Titani. L'òxid de Titani ens provoca una reducció de les propietats mecàniques de la soldadura i del material. L'òxid de Titani es caracteritza pel seu color blau Turquesa. Per a evitar l'aparició d'aquest fenomen, a continuació se'n destaquen algunes de les tècniques emprades:
 - L'òxid de Titani apareix a causa de les elevades temperatures que s'assoleixen durant la soldadura. Per aquest motiu s'utilitzen dissipadors de calor que es situen a l'interior dels tubs de direcció, pedalier i seient. L'objectiu principal d'aquests components és el d'evitar que s'assoleixin temperatures extremadament elevades als tubs a causa de la soldadura.
 - Un cop situats els dissipadors de calor als tubs que s'han d'unir, s'hi fa circular argó a través dels dissipadors per tal que l'oxigen del interior pugui sortir i no hi hagi presència d'oxigen a l'interior dels tubs durant la soldadura. D'aquesta forma es minimitza el risc d'aparició d'òxid de Titani.

La soldadura TIG per als quadres de Titani s'ha de realitzar amb corrent continua.

2. Mètode d'anàlisi

En aquesta secció, es defineixen els fonaments en que es basa l'anàlisi per elements finits. Un cop plantejades les bases, s'explica el mètode d'elements finits utilitzat per a fer l'estudi dels casos, Solidworks, on s'indiquen les virtuts i defectes del mòdul FEM que utilitza aquest programa.

2.1. Definició

El mètode dels elements finits, també conegut com a MEF de forma abreviada (FEM en anglès), és un mètode numèric general per a la aproximació de solucions d'equacions diferencials parcials molt complexes utilitzats en diversos problemes d'enginyeria i física.

El MEF està dissenyat per al seu ús en ordinadors i permet resoldre equacions diferencials associades a un problema físic sobre geometries complexes. Aquest mètode s'utilitza per al disseny i millora de productes i aplicacions industrials, així com la simulació de sistemes físics complexos.

2.2. Forma de treball del MEF a la pràctica

Aquest mètode, és un mètode numèric de resolució d'equacions diferencials, per tant, la solució obtinguda per MEF és només aproximada, coincidint amb la solució exacta només en un número finit de punts denominats nodes. En la resta de punts que no són nodes, els resultats s'obtenen interpolant els resultats obtinguts als nodes, així doncs, els resultats obtinguts per aquest mètode s'han de considerar aproximats degut a la interpolació que s'hi produeix.

El MEF fa una conversió d'un problema definit en termes d'equacions diferencials en un problema en forma matricial que proporciona un resultat correcte per a un número de punts i interpola posteriorment la resta del domini. A partir dels nodes, crea una xarxa denominada malla formada per reticles. Cadascun d'aquests reticles és un element finit. Aquest conjunt de nodes s'obté dividint o discretitzant l'estructura en elements finits de forma variada com per exemple superfícies, volums i barres.

Des del punt de vista de la programació algorítmica, les tasques necessàries per a dur a terme un càlcul MEF es divideixen en pre-processat, càlcul i post-processat.

2.2.1. Preprocessat i generació de la malla

En aquesta tasca, es defineix la geomètrica, es genera la malla, s'estableixen les condicions de contorn i s'assignen les propietats dels materials.

La generació de la malla, en general, consta de milers de punts. La informació sobre les propietats del material i d'altres característiques del problema s'emmagatzema junt amb la informació que descriu la malla. En quant a les forces, aquestes es reassignen als punts de la malla. Als nodes de la malla se'ls assigna una densitat per tot el material depenent del nivell de la tensió mecànica o una altra propietat. Les regions amb una major quantitat de tensions acumulen una major densitat de nodes que d'altres regions que experimenten poques tensions o no en reben. Els punts que esdevenen d'interès són els punts de fractura que han estat provats prèviament del material, entrades, cantonades, detalls complexos i àrees de tensions elevades.

2.2.2. Càlcul i resolució de sistemes d'equacions

En un problema mecànic lineal i no depenent del temps, amb un problema d'anàlisi estructural estàtic o un problema elàstic, el càlcul generalment es redueix a obtenir els desplaçaments dels nodes i amb ells definir, de forma aproximada, el camp de desplaçaments en l'element finit.

2.2.3. Post-processat

Degut a la dificultat de calcular problemes complexos, els fitxers generats del anàlisi FEM contenen una quantitat tan gran d'informació que resulta convenient processar aquestes dades d'alguna manera addicional per a facilitar-ne la comprensió i il·lustrar diferents aspectes del problema. En aquesta etapa, els resultats obtinguts de la resolució del sistema són tractats per a obtenir representacions gràfiques i obtenir magnituds derivades que permetin extreure'n les conclusions del problema.

2.3. Tipus d'anàlisis d'enginyeria

A l'hora d'estudiar els casos d'interès a l'enginyeria, es divideixen en sistemes lineals o no lineals. Els sistemes lineals es caracteritzen per ser menys complexos i normalment no tenen en compte les deformacions plàstiques. Segons el grau de sofisticació, es pot arribar a verificar si el material presentaria fractura.

Alguns dels anàlisis d'enginyeria més comuns que utilitzen el MEF són:

- Anàlisi estàtic

S'utilitza quan l'estructura està sotmesa a accions estàtiques, és a dir, que no depenen del temps.

- Anàlisi vibracional

S'utilitza per a analitzar l'estructura sotmesa a vibracions aleatòries com puguin ser xocs o impactes. Cadascuna d'aquestes accions, pot actuar en la freqüència natural de l'estructura i causar ressonància i la consegüent fallida.

- Anàlisi de fatiga

Ajuda als dissenyadors a predir la vida del material o estructura assajada, predint l'efecte dels cicles de càrrega sobre l'objecte. Aquest anàlisi pot mostrar les àrees on és més probable que aparegui una esquerda. Aquest anàlisi per fatiga pot predir també la tolerància a la fallida del material.

- Anàlisi de transferència de calor

Els models d'anàlisi de transferència de calor per conductivitat o per dinàmiques tèrmiques de flux de material o en la seva estructura. L'estat continu de transferència es refereix a les propietats tèrmiques en el material que té una difusió lineal de calor.

2.3.1. Resultats del MEF

El MEF ha esdevingut una solució a l'hora de predir els errors deguts a tensions desconegudes mostrant els problemes de la distribució de tensions en el material i permetent als dissenyadors veure totes les tensions involucrades. Aquest mètode de disseny i prova del producte és millor als assaig-error on s'han de produir costos de manufactura associats a la construcció de cada exemplar després de les proves.

Les grans avantatges del càlcul per ordinador es poden resumir en:

- Possibilita el càlcul d'estructures que, degut al gran nombre d'operacions que es necessiten per a resoldre-la o bé per la dificultat de les mateixes, eren inabordables a la pràctica mitjançant el càlcul manual.
- En la majoria de casos redueix a límits menyspreables el risc d'errors operatius.

2.3.2. MEF d'ordre superior

Degut a la creixent complexitat de les simulacions d'enginyeria, els últims avenços en el camp dels elements finits indiquen que el futur està en mètodes d'adaptació d'ordre superior. Aquesta adaptació no és més que la resolució simultània de fenòmens amb múltiples escales. Un dels avenços més destacats és l'anomenada adaptabilitat. L'adaptabilitat orientada a un

objectiu està basada en la adaptació de la malla d'elements finits amb l'objectiu de millorar la resolució en una quantitat específica d'interès en lloc de reduir al mínim error la aproximació en una norma global.

2.3.3. Limitacions

Tal i com s'utilitza actualment el MEF, presenta una sèrie de limitacions:

- El MEF calcula solucions numèriques concretes i adaptades a unes dades particulars d'entrada, no pot fer un anàlisi de sensibilitat senzill que permeti conèixer com variarà la solució si algun dels seus paràmetres s'altera lleugerament. És a dir, únicament proporciona respostes numèriques quantitatives concretes, no relacions qualitatives generals.
- El MEF proporciona una solució aproximada sense poder arribar a quantificar el marge d'error, en general és desconegut. Si bé alguns dels tipus de problemes permeten acotar l'error de la solució, degut a diversos tipus d'aproximacions que utilitza el mètode, els problemes no lineals o dependents del temps, en general, no permet conèixer el grau d'error.
- En el MEF la majoria d'aplicacions pràctiques requereix molt de temps per a ajustar detalls de geometria existint, freqüentment, problemes de mal condicionament de les malles, un grau desigual de convergència de la solució aproximada cap a la solució exacta en diferents punts, etc. En general, una simulació requereix l'ús de nombroses proves i assajos amb geometries simplificades o casos menys generals que el que finalment es pretén simular, abans de començar a aconseguir resultats satisfactoris.

2.4. Solidworks Simulation

En aquest apartat s'expliquen les característiques principals del software utilitzat per a fer l'anàlisi d'elements finits, explicant els diferents estudis que es poden realitzar a un model o conjunt 3D, el tipus de mallat que es realitza i finalment, explicar de forma breu els mètodes adaptatius que té aquest software.

2.4.1. Tipus d'estudi

En aquest apartat, es mencionen els estudis que es poden realitzar amb el mòdul FEM de Solidworks. Aquest programa pot realitzar més estudis dels que apareixen en aquest apartat però s'ha optat per centrar-se en aquells que poden ser interessants a l'hora d'analitzar el comportament d'un quadre de bicicleta, ja sigui per a realitzar-ho en aquest treball o en cas de que es vulgui ampliar l'abast del treball en una altra ocasió.

Les simulacions més interessants que ofereix Solidworks per a l'estudi d'un quadre de bicicleta són:

2.4.1.1. Estudis estàtics

També coneguts com a estudis de tensió. Aquests estudis calculen els desplaçaments, les forces de reacció, deformacions unitàries, tensions i la distribució del factor de seguretat per les diferents zones del model 3D o assemblatge. Gràcies a aquestes simulacions i els resultats visuals que genera el software, ens permet veure les zones on tenim un factor de seguretat més baix o, per exemple, veure les zones on el material falla degut a que les tensions excedeixen un cert valor. Els càlculs del factor de seguretat es basen en el criteri de falla. Solidworks ens permet escollir entre 4 criteris de falla.

La realització d'aquest estudi, ens permet detectar falles del material provocades per altes tensions. Com és conegut, un factor de seguretat inferior a la unitat ens indica una fallida del material. Per tant, observant factors de seguretat elevats en una regió concreta indiquen tensions baixes i la possibilitat d'eliminar algun material d'aquesta regió.

2.4.1.2. Estudis de disseny

Els estudis de disseny ens permeten optimitzar la recerca d'un disseny sobre la base d'un model geomètric. Solidworks permet detectar les tendències existents i proposar la solució que es creu més òptima utilitzant el mínim nombre d'operacions. Per a realitzar aquests estudis, es necessita definir una sèrie de punts:

- Objectius

Cal definir l'objectiu del estudi. Una situació que ens podríem plantejar seria, per exemple, minimitzar el material que s'utilitza. Si no es defineix cap tipus d'objectiu, el programa realitza un estudi de no optimització del disseny.

- Variables

S'han de seleccionar les cotes que poden canviar i s'estableixen uns intervals de modificació, com per exemple el rang mínim i màxim que es podria extrudir o la quantitat que podríem extreure, mínima i màxima, en diàmetre d'un dels elements del nostre model o assemblatge.

- Restriccions

S'estableixen les condicions que es busquen per a obtenir el disseny més òptim. Alguns exemples de restriccions podrien ser, per exemple, que les tensions, desplaçaments o

temperatures no excedeixin uns determinats valors i que la freqüència natural estigui dins d'un interval especificat.

2.4.1.3. Estudis de caiguda

Aquest tipus d'estudi, avalua els efectes de deixar caure una peça o assemblatge sobre una superfície rígida o flexible. Aquestes simulacions poden utilitzar-se per a simular l'impacte d'un model 3D sobre una superfície plana rígida o flexible.

2.4.1.4. Estudis de fatiga

Les càrregues i descàrregues repetides debiliten els objectes amb el temps, fins i tot quan les tensions induïdes son considerablement inferiors als límits de tensió permesos. Aquest estudi de fatiga, és convenient quan es necessita un estudi que vagi més enllà dels resultats que s'obtenen mitjançant estudis lineals o no lineals. L'estudi de fatiga calcula la resposta d'un disseny subjecte a un entorn específic de restriccions i càrregues. Si es consideren les suposicions d'anàlisi i es determina que les tensions calculades es troben dins dels límits permesos, els estudis conclouen que el disseny es segur en aquest entorn independentment de quants cops se li apliqui la càrrega. Els estudis de fatiga avaluen la vida consumida d'un objecte sobre la base de casos de fatiga i corbes S-N. Aquests càlculs de fatiga es poden basar en la intensitat de la tensió, les tensions de Von Misses o les tensions alternes principals màximes.

2.4.2. Característiques del mallat

El procés comença a partir de la creació d'un model geomètric. A continuació, el programa subdivideix el model en petites porcions de formes simples, anomenades elements, connectades en punts comuns anomenats nodes. Solidworks considera el model com una xarxa d'elements discrets interconnectats.

El mètode FEM, prediu el comportament del model mitjançant la combinació de la informació obtinguda a partir de tots els elements que conformen el model.

Solidworks compta amb una eina de mallat automàtic on el software genera una malla basant-se en un tamany d'element global, una tolerància i especificacions locals de control de malla. Amb el control de malla, podem especificar diferents grandàries d'elements de components, cares, arestes i vèrtex.

El programa genera un tamany d'element global per al model tenint en compte el seu volum, superfície i d'altres detalls geomètrics. La grandària d'aquesta malla generada, dependrà de la geometria i les cotes del model, el tamany de l'element, la tolerància de la malla, el control de

la malla i les especificacions de contacte. La grandària dels elements, ens afecta a la precisió dels resultats. Optant per un tamany d'element més gran, l'anàlisi es realitzarà més ràpidament però, com a contrapartida els resultats tindran una precisió menor. En canvi, disminuint la grandària del element, els resultats que se n'obtinguin seran més precisos però es necessitarà un temps major d'anàlisi.

2.4.3. Mètodes adaptatius

Aquests mètodes estan basats en l'estimació del error. Existeixen principalment dos mètodes per a millorar l'exactitud dels resultats dels estudis estàtics:

2.4.3.1. Mètode H

El concepte del mètode H consisteix en l'ús d'elements més petits en regions amb alts nivells d'error. Un cop el programa executa l'estudi i estima els errors, el software automàticament refina la malla on sigui necessari per a millorar-ne els resultats.

2.4.3.2. Mètode P

El concepte del mètode P consisteix en l'ús d'elements més eficaços en regions amb alts nivells d'error. Un cop executat l'anàlisi i estimar els errors, el programa augmenta l'ordre dels elements en les regions amb el nivell d'error més alt que el nivell especificat per l'usuari i refà l'estudi.

Aquest mètode no produeix alteracions sobre la malla, sinó que canvia l'ordre dels polinomis utilitzats per a aproximar el camp de desplaçament. L'ús d'un ordre polinomial unificat per a tots els elements, no resulta eficaç. El software incrementa l'ordre del polinomi només si és necessari. Aquest mètode P, només és compatible amb elements sòlids. A l'activar aquesta opció, és possible que el programa executi el problema diversos cops. Després de cada cicle, el programa avalua els errors locals i globals i decideix si realitzarà un altre càlcul.

El software finalitza les iteracions quan es compleix alguna de les següents condicions:

- El criteri global convergeix.
- Tots els errors locals convergeixen, per exemple, per a cada element.
- S'assoleix el número màxim d'iteracions.

3. Definició del estudi

En aquest apartat, s'estableixen les bases i els criteris a seguir a l'hora d'assajar els diferents casos d'estudi pel mètode d'elements finits. En quant a la definició de les bases, es defineixen les forces, moments i reaccions presents a cadascun dels casos. En quant a la definició dels criteris a seguir, s'estableixen les hipòtesis i suposicions que s'han pres a l'hora d'assajar el model 3D i es mencionen els paràmetres comparatius a tenir en compte un cop obtinguts els resultats dels estudis FEM.

3.1. Presentació dels dissenys

A continuació, es presenten els dissenys utilitzats a l'hora de fer l'anàlisi FEM per al quadre d'Acer i per al quadre d'Alumini. A nivell geomètric, ambdós quadres són iguals per a evitar que aquest factor pugui afectar als resultats obtinguts.

Per a cadascun dels quadres d'assaig, es pot observar les propietats més rellevants dels materials utilitzats. Les dades són extretes directament de la base de dades de Solidworks ja que els resultats obtinguts amb aquest software en depenen directament d'aquests valors.

A la taula que es pot observar a continuació, es defineix breument cadascuna de les propietats que apareixen posteriorment en aquest apartat.

Propietat	Definició
Mòdul elàstic	És la mesura de la rigidesa d'un material elàstic. Es defineix com la relació entre la tensió uniaxial i l'allargament unitari uniaxial en el rang de tensions abans d'arribar al límit elàstic, és a dir, just abans de que hi apareguin deformacions permanents.
Coefficient de Poisson	És una constant elàstica que proporciona una mesura de l'estrenyiment de secció d'un prisma de material elàstic lineal i isòtrop quan s'estira longitudinalment i s'aprima en les direccions perpendiculars al estirament.
Límit elàstic	També conegut com a límit de fluència, és la tensió màxima que un material elàstic pot suportar sense patir deformacions permanents.
Límit de tracció	És la tensió màxima resistida per una proveta dividida per la secció inicial de la proveta.

Densitat	És una magnitud escalar que indica la massa per unitat de volum d'una substància.
----------	---

Taula 7: Definició de les diferents propietats mecàniques dels materials a analitzar

L'elecció del acer 4130 i del alumini 6061-T6, és degut a que son els materials més emprats a l'hora de fabricar els quadres de bicicleta de carretera a l'actualitat gràcies a les seves propietats mecàniques. A continuació se'n detallen les propietats més destacades de cadascun dels materials.

3.1.1. Quadre d'acer

A la taula que es pot observar a continuació, apareixen les propietats del material escollit més importants per al tipus d'assaig que es realitza. El nom inclòs a la taula, és el nom amb el qual Solidworks denomina al material.

Acer AISI 4130 recuit 865°C	
Mòdul elàstic [GPa]	205
Coeficient de Poisson [/]	0,285
Límit elàstic [MPa]	460
Límit a la tracció [MPa]	560
Densitat [kg/m ³]	7850

Taula 8: Propietats del Acer AISI 4130. Font: Solidworks.

3.1.2. Quadre d'alumini

A la taula que es pot observar a continuació, apareixen les propietats del material escollit més importants per al tipus d'assaig que es realitza. El nom inclòs a la taula, és el nom amb el qual Solidworks denomina al material.

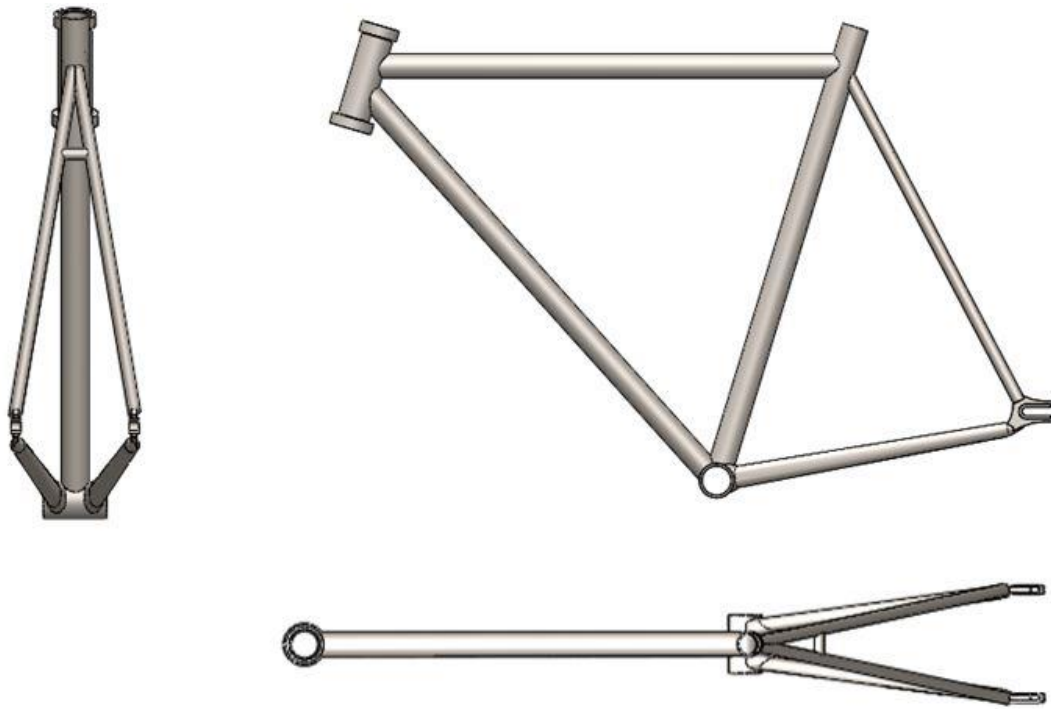
6061-T6 (SS)	
Mòdul elàstic [GPa]	69
Coeficient de Poisson [/]	0,33
Límit elàstic [MPa]	275
Límit a la tracció [MPa]	310
Densitat [kg/m ³]	2700

Taula 9: Propietats del Alumini 6061-T6. Font: Solidworks.

Un cop introduïdes les propietats més destacades del material, es presenta el model 3D del quadre d'Alumini amb el que es durà a terme l'anàlisi FEM pels diferents casos d'estudi.

3.1.3. Presentació del model 3D

A continuació, es presenten tres vistes del quadre emprat per a fer-ne els diferents estudis que es presenten a continuació. Per aquests estudis, només s'assaja una geometria, la mateixa per al quadre d'acer i alumini. El motiu d'aquesta decisió és la de comparar els dos materials sota les mateixes condicions, evitant així que el factor geomètric ens pugui afectar a la comparativa. S'ha optat també per utilitzar el mateix gruix de paret als tubs que conformen el quadre pels dos materials amb l'objectiu de poder comparar el comportament de cadascun d'ells. Les dimensions a nivell de longitud dels tubs i els angles que formen entre ells han estat extretes a partir del plànol proporcionat pel fabricant, es pot consultar a l'Annex 3. Els diàmetres exteriors dels tubs han estat mesurats amb peu de rei i, per últim, l'espessor de paret del tub és un valor estimat de 2 mm obtingut a partir de fer recerca d'informació.



Il·lustració 12: quadre de bicicleta a analitzar

Un cop presentat el model a analitzar, se'n detallen els pesos pel quadre d'acer i d'alumini. El valor de les masses ha estat obtingut mitjançant el càlcul de la massa realitzat per Solidworks. Per a l'obtenció del pes del quadre, es pren un valor de gravetat de 10 m/s^2 .

	Massa del quadre (kg)	Gravetat (m/s^2)	Pes del quadre (N)
Acer	5,2	10	52
Alumini	1,8	10	18

Taula 10: pesos dels quadres d'acer i d'alumini

Aquests valors de pes, són utilitzats a l'hora de calcular les reaccions al quadre d'acer i al quadre d'alumini.

3.2. Definició dels paràmetres comparatius i de les hipòtesis

En aquest apartat, es defineixen tots aquells paràmetres que es comparen un cop obtinguts els resultats dels diferents casos d'estudi. A part d'això, també queden especificades les diferents hipòtesis i assumpcions aplicades a cadascun dels estudis FEM.

3.2.1. Definició dels paràmetres comparatius

A l'hora de comparar els resultats obtinguts i extreure'n les conclusions oportunes, es tenen en compte els següents criteris o paràmetres:

- Comparació de les tensions per a cadascun dels casos en funció del material del quadre.
- Comparació dels desplaçaments que es produeixen en cadascun dels casos en funció del material utilitzat al quadre.
- Comparació de les deformacions produïdes a cada cas en funció del material utilitzat al quadre.
- Comparació dels valors de Factor de Seguretat de treball en cada cas i observar els canvis produïts en funció del material utilitzat al quadre.

3.2.2. Definició de les hipòtesis

Amb l'objectiu d'analitzar sota les mateixes condicions ambdós quadres, a continuació es presenten les hipòtesis i assumpcions que s'han pres a l'hora d'executar els diferents casos d'estudi. Aquestes hipòtesis queden dividides en dos grans grups, hipòtesis de material i hipòtesis relacionades amb l'aplicació de les forces.

- **Hipòtesis de material**
 - 1) Es suposen materials isòtrops.
 - 2) Es suposen materials continus i homogenis.
 - 3) Es suposen petites deformacions.
- **Hipòtesis d'aplicació de les forces**
 - 1) Es suposa un pes de ciclista de 75 kg per als casos 1, 2 i 3. Per al cas 4, que es un pitjor cas, es suposa un pes de 100 kg.
 - 2) Es fa un arrodoniment en el valor de gravetat (g) de 10 m/s^2 .
 - 3) Es suposa que la seqüència de pedaleig suposa forces constants i, per tant, tensions constants (No s'analitza fatiga).

- 4) Al tractar-se d'un estudi estàtic, no es consideren friccions, ni pèrdues per fricció ni rodadura.
- 5) Es suposen totes les forces puntuals.
- 6) Es suposa un pendent del 10% pels casos 2, 3 i 4.
- 7) Es suposa una força de pedaleig de 1000 N pels casos 1, 2 i 3. Aquest valor ha estat obtingut del llibre *La Ingeniería de la Bicicleta*.
- 8) Per al cas 4 s'aplica una força de pedaleig de valor 1875 N. Aquest valor de força, és una dada obtinguda de test.
- 9) Els valors de pes del quadre, tant de l'Acer com de l'Alumini, han estat obtinguts directament de Solidworks.
- 10) Es suposa l'absència de vent meteorològic.
- 11) La força de pedaleig i el moment M1 degut al pedaleig, queden aplicats a la banda esquerra del quadre, respecte l'eix de simetria.
- 12) A la banda dreta del quadre, concretament a la banda dreta del manillar, apareix una força equilibradora de component vertical (F_{eq}) que es contraposa al Moment M2 degut al pedaleig i equilibra el sistema.
- 13) Les forces situades al tub de pedalier únicament tenen component vertical.

3.3. Casos d'estudi

A continuació, es defineixen els casos a analitzar mitjançant el mètode d'elements finits. Per a cadascun dels casos, s'indiquen les forces i moments a aplicats així com imatges de la zona d'aplicació de cadascuna de les càrregues.

Per a evitar sobrecarregar aquest apartat, no apareixen els càlculs realitzats a l'hora de determinar les forces i moments de cada cas. Si es vol saber d'on s'han obtingut els diferents resultats, dirigiu-vos a l'annex 1.

Els casos que s'analitzen en aquest apartat són els següents:

- 1) Cas 1: Ciclista assegut pedalant sobre un terreny pla
- 2) Cas 2: Ciclista assegut pedalant sobre un terreny en pendent.
- 3) Cas 3: Ciclista dempeus pedalant sobre un terreny en pendent.
- 4) Cas 4: Ciclista de 100 kg dempeus pedalant sobre un terreny en pendent.

3.3.1. Cas 1: ciclista assegut pedalant en pla

Per aquest primer cas d'estudi, es simula una situació real de treball, sense ser un pitjor cas, on el ciclista es troba assegut a la bicicleta mentre circula a velocitat constant per un terreny completament pla.



Il·lustració 13: Imatge il·lustrativa del cas 1 d'estudi. Font: *La Ingeniería de la bicicleta*.

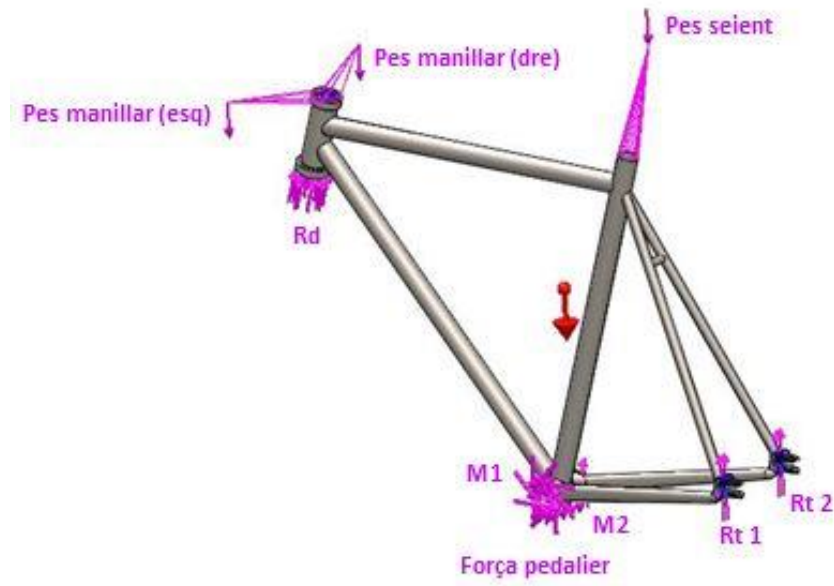
3.3.1.1. Resum de forces i moments a aplicar al cas 1

A continuació, s'especifica el punt d'aplicació de les diferents forces presents al quadre en aquest cas 1. Per aquest primer cas, el pes del ciclista quedarà repartit en les parts que es poden veure a continuació:

- Manillar
- Seient
- Pedalier

Un cop especificades les zones d'aplicació del pes del ciclista, es presenten les càrregues a aplicar al model 3D així com la zona d'aplicació de les mateixes. Per a més detalls de l'obtenció de les dades, càlculs de les forces i comprovació del sumatori de les forces verticals, dirigiu-vos a l'annex 1.

▪ Aplicació de les càrregues al model 3D



Il·lustració 14: aplicació de totes les càrregues al model 3D (Cas 1)

▪ Resum de forces a aplicar als dos quadres

Tipus de Força/Pes a aplicar	Zona d'aplicació	Valor [N]
Pes braç (esquerra)	Manillar (esquerra)	62,63
Pes braç (dret)	Manillar (dreta)	62,63
Força Equilibri	Manillar (dreta)	671
Pes del tronc	Seient	326,25
Pes de les cames	Pedalier	298,5
Força per vèncer les pèrdues	Pedalier	11,5
Força pedaleig	Pedalier	1000

Taula 11: resum de forces i pesos a aplicar (Cas 1)

▪ **Moments deguts al pedaleig**

Tipus de moment	Valor [Nm]
Moment 1 (M_1)	170
Moment 2 (M_2)	110

Taula 12: resum dels moments a aplicar (Cas 1)

▪ **Reaccions**

Les reaccions variaran en funció del material del quadre, a continuació s'adjunta una taula amb els valors a aplicar.

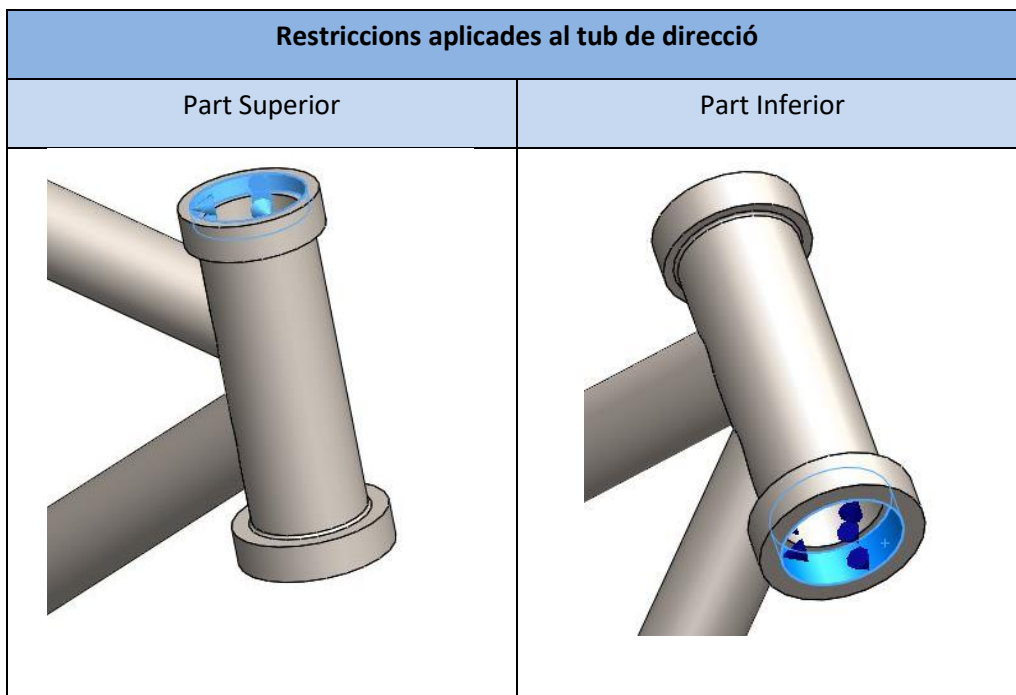
Material del quadre	Acer	Alumini
Roda davantera (R_d) [N]	320,8	307,2
Roda darrere (R_t) [N]	481,2	460,8

Taula 13: resum de les reaccions a aplicar (Cas 1)

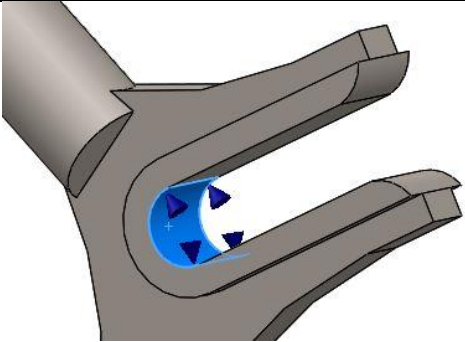
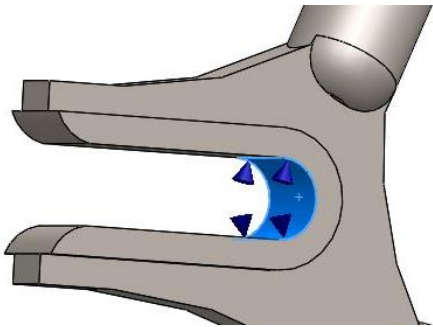
3.3.1.2. Restriccions aplicades al model 3D

Les restriccions aplicades al model 3D del quadre, són exclusivament restriccions de rodament.

A continuació, s'indiquen les zones on s'han aplicat aquestes restriccions.



Taula 14: imatges de les restriccions aplicades al tub de direcció (Cas 1)

Restriccions aplicades a les punteres del quadre	
Puntera Esquerra	Puntera Dreta
	

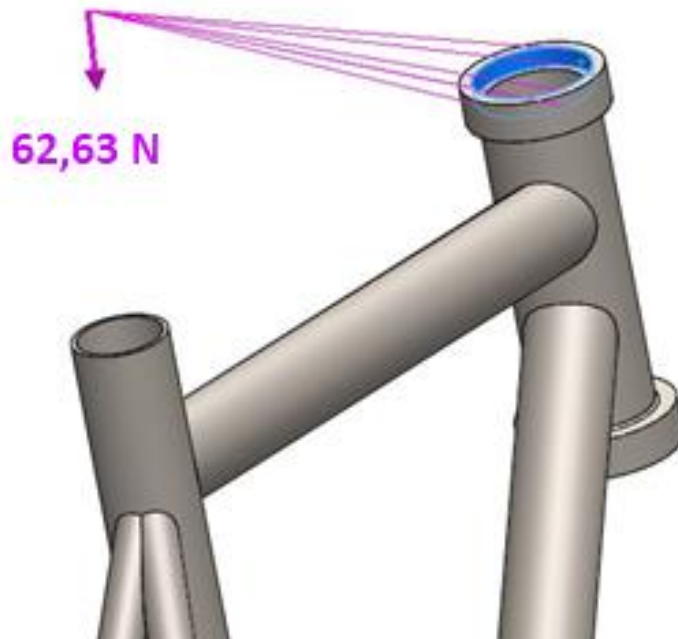
Taula 15: imatges de les restriccions aplicades a les punteres del quadre (Cas 1)

3.3.1.3. Aplicació de les càrregues al model 3D

- Pes aplicat a la banda esquerra del manillar

Pes manillar (esq.)		
Pes a aplicar	Zona aplicació	Valor [N]
Pes braç (esquerra)	Manillar (esquerra)	62,63

Taula 16: Pes a la part esquerra del manillar (Cas 1)

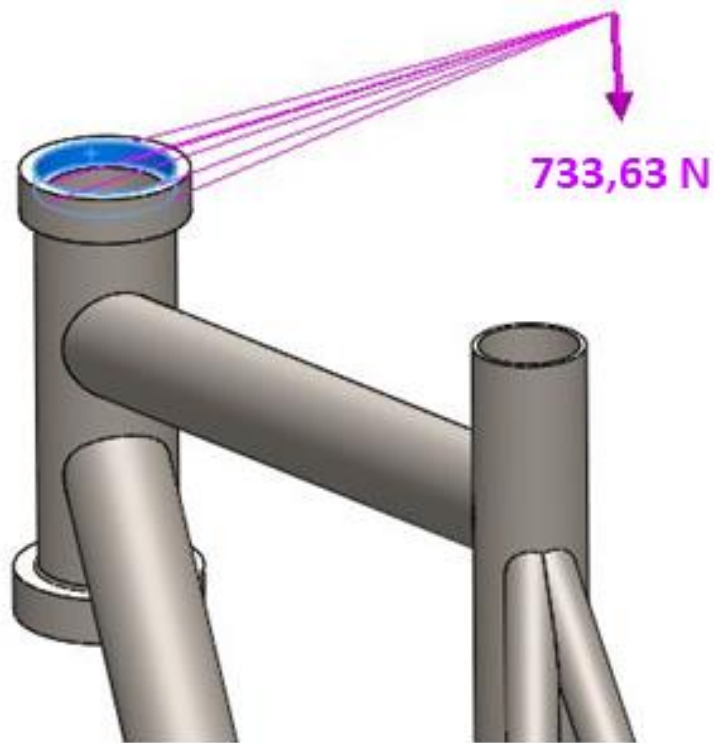


Il·lustració 15: Aplicació del pes a la part esquerra del manillar (Cas 1)

- Forces aplicades a la banda dreta del manillar

Pes manillar (dre.)		
Forces a aplicar	Zona aplicació	Valor [N]
Pes braç (dret)	Manillar (dreta)	62,63
Força Equilibri	Manillar (dreta)	671
Total a aplicar		733,63

Taula 17: Forces a la part dreta del manillar (Cas 1)

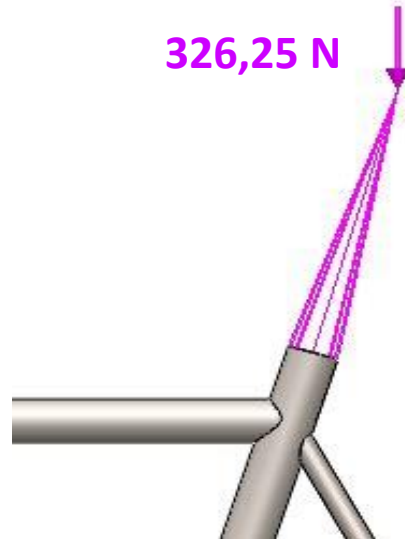


Il·lustració 16: Aplicació de les forces a la part dreta del manillar (Cas 1)

▪ Pes aplicat al seient

Pes seient		
Pes a aplicar	Zona aplicació	Valor [N]
Pes del tronc	Seient	326,25

Taula 18: Pes aplicat al seient (Cas 1)

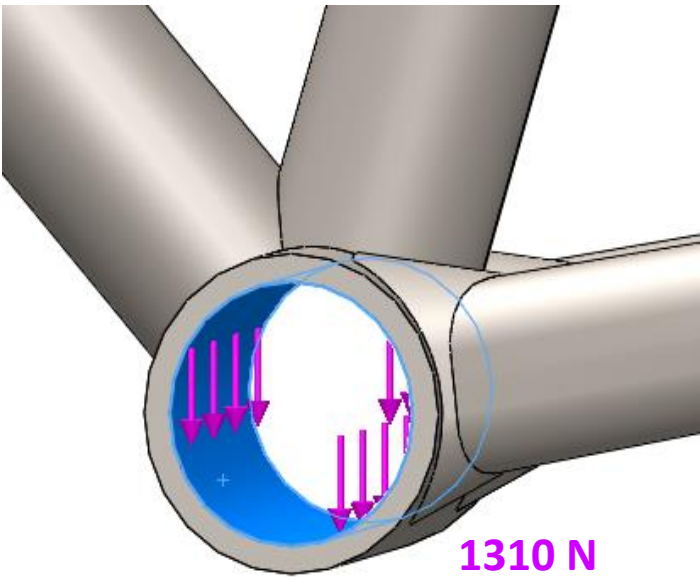


Il·lustració 17: Aplicació del pes al seient (Cas 1)

▪ Forces aplicades al tub de pedalier

Força pedalier		
Forces a aplicar	Zona aplicació	Valor [N]
Pes de les cames	Pedalier	298,5
Força per vèncer les pèrdues	Pedalier	11,5
Força pedaleig	Pedalier	1000
Total a aplicar		1310

Taula 19: Forces al tub de pedalier (Cas 1)

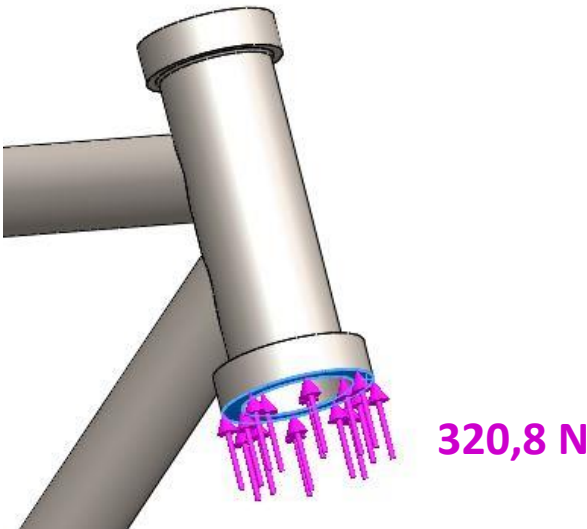


Il·lustració 18: Aplicació de les forces al tub de pedalier (Cas 1)

- Aplicació de les reaccions
 - Quadre Acer
 - Reacció roda davantera

Reacció davant	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda davantera (R_d)	320,8

Taula 20: Reacció roda davantera quadre Acer (Cas 1)

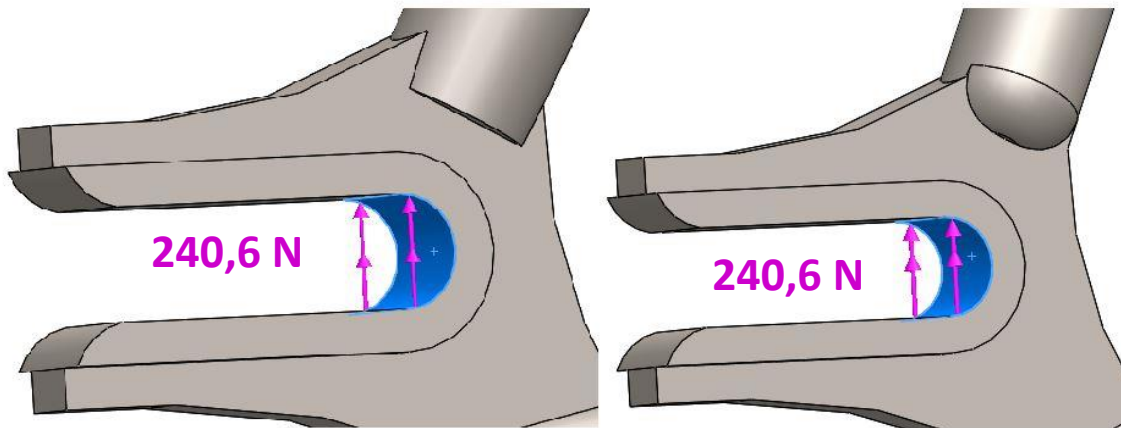


Il·lustració 19: Aplicació reacció roda davantera quadre Acer (Cas 1)

▪ Reacció roda del darrere

Reacció darrere 1 i 2	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda darrere (R_r)	481,2

Taula 21: Reacció roda darrere quadre Acer (Cas 1)

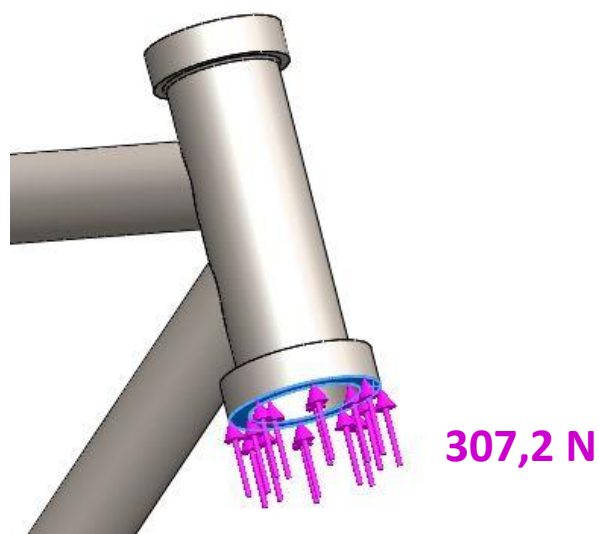


Il·lustració 20: Aplicació reacció roda darrere quadre Acer puntera esquerra i dreta (Cas 1)

▪ Reacció roda davantera

Reacció davant	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda davantera (R_d)	307,2

Taula 22: Reacció roda davantera quadre Alumini (Cas 1)

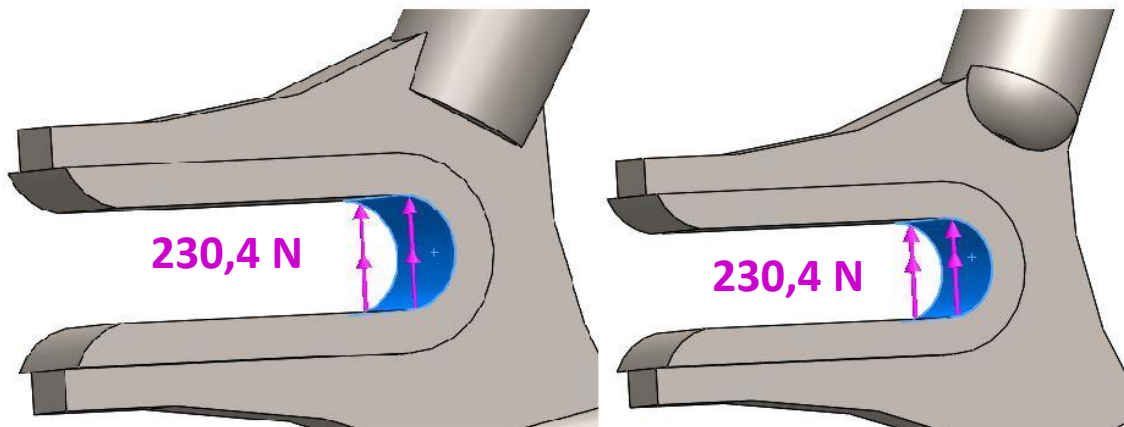


Il·lustració 21: Aplicació reacció roda davantera quadre Alumini (Cas 1)

- Reacció roda del darrere

Reacció darrere 1 i 2	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda darrere (R_t)	460,8

Taula 23: Reacció roda darrere quadre Alumini (Cas 1)



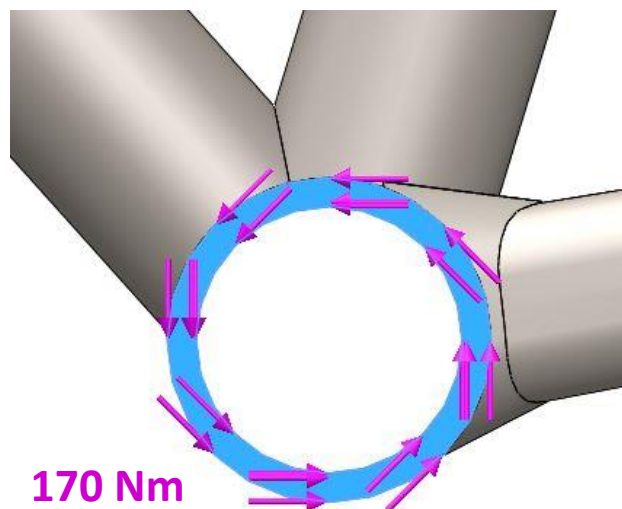
Il·lustració 22: Aplicació reacció roda darrere quadre Alumini puntera esquerra i dreta (Cas 1)

3.3.1.4. Aplicació dels moments al model 3D

- Moment 1

Típus de moment	Valor [Nm]
Moment 1 (M_1)	170

Taula 24: Valor del moment 1 (Cas 1)

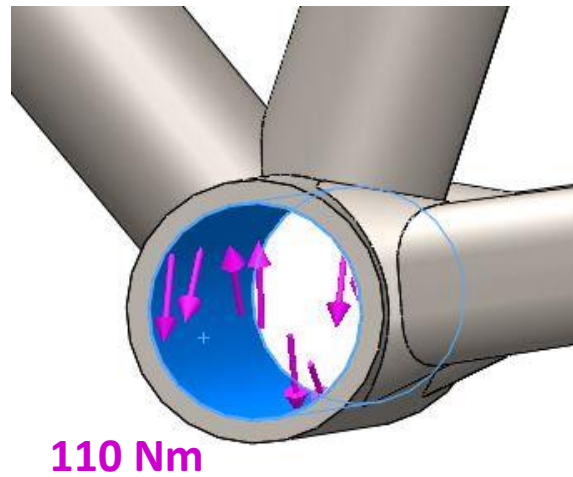


Il·lustració 23: Aplicació del moment 1 (Cas 1)

▪ Moment 2

Tipus de moment	Valor [Nm]
Moment 2 (M_2)	110

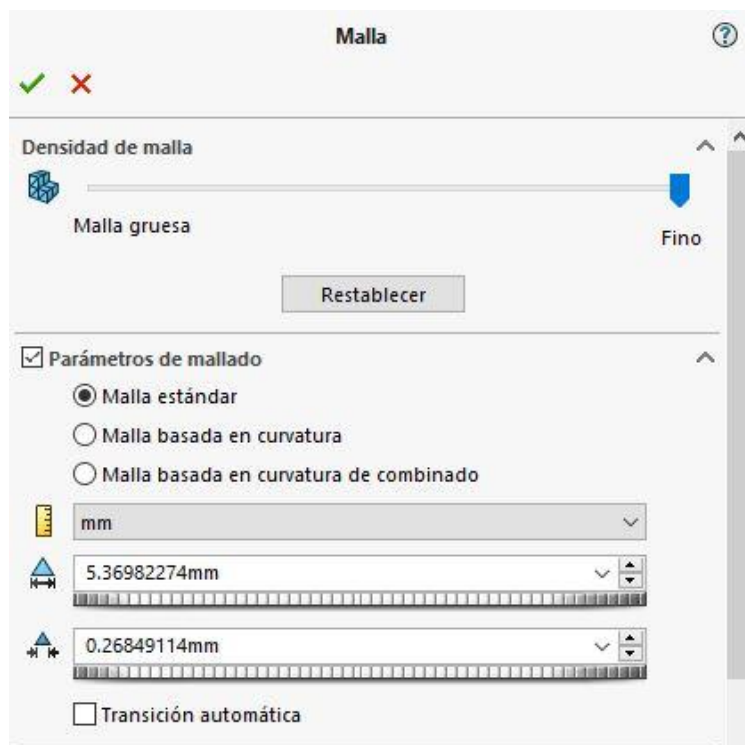
Taula 25: Valor del moment 2 (Cas 1)



Il·lustració 24: Aplicació del moment 2 (Cas 1)

3.3.1.5. Propietats del mallat

A nivell del mallat, s'ha establert una densitat de malla fina. Això implica un número major de punts a analitzar i, com a conseqüència, uns resultats més acurats.



Il·lustració 25: propietats del mallat (Cas 1)

A continuació es mostra una imatge amb el mallat del quadre.

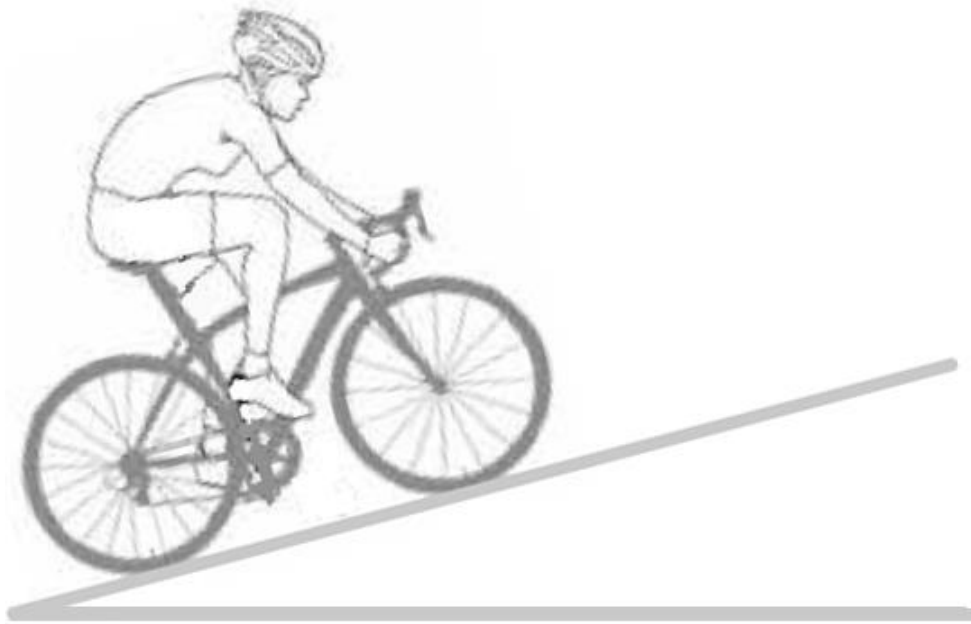


Il·lustració 26: mallat del model 3D (Cas 1)

Tal i com es pot observar a la imatge superior, Solidworks aplica un mallat uniforme a tot el quadre. Observant la il·lustració 25, s'ha escollit una densitat de malla fina que es tradueix en 100817 nodes i 52521 elements. Aquest número de nodes i elements ens proporciona una resolució suficient per a fer front a l'anàlisi.

3.3.2. Cas 2: ciclista assegut pujant una pendent

Per aquest segon cas d'estudi, es simula una situació real de treball, sense ser un pitjor cas, on el ciclista es troba assegut a la bicicleta mentre circula a velocitat constant d'ascensió per un terreny amb un pendent del 10%.



Il·lustració 27: Imatge il·lustrativa del cas 2 d'estudi. Font: *La Ingeniería de la bicicleta*.

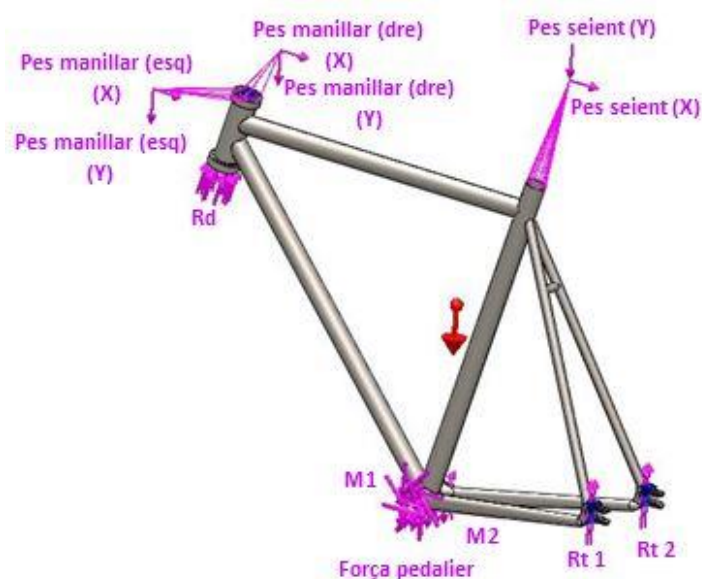
3.3.2.1. Resum de forces i moments a aplicar al cas 2

A continuació, s'especifica el punt d'aplicació de les diferents forces presents al quadre en aquest cas 2. Per aquest segon cas, el pes del ciclista quedarà repartit en les parts que es poden veure a continuació:

- Manillar
- Seient
- Pedalier

Un cop especificades les zones d'aplicació del pes del ciclista, es presenten les càrregues a aplicar al model 3D així com la zona d'aplicació de les mateixes. Per a més detalls de l'obtenció de les dades, càlculs de les forces i comprovació del sumatori de les forces verticals, dirigiu-vos a l'annex 1.

- Aplicació de les càrregues al model 3D



Il·lustració 28: aplicació de totes les càrregues al model 3D (Cas 2)

- Resum de forces a aplicar als dos quadres

Tipus de Força/Pes a aplicar	Zona d'aplicació	Valor [N]	Valor Component X [N]	Valor Component Y [N]
Pes braç (esquerra)	Manillar (esquerra)	62,63	6,55	62,29
Pes braç (dret)	Manillar (dreta)	62,63	6,55	62,29
Força Equilibri	Manillar (dreta)	671		671
Pes del tronc	Seient	326,25	34,10	324,46
Pes de les cames	Pedalier	298,5		298,5
Força per vèncer les pèrdues	Pedalier	91,5		91,5
Força pedaleig	Pedalier	1000		1000

Taula 26: resum de forces i pesos a aplicar (Cas 2)

▪ **Moments deguts al pedaleig**

Tipus de moment	Valor [Nm]
Moment 1 (M_1)	170
Moment 2 (M_2)	110

Taula 27: resum dels moments a aplicar (Cas 2)

▪ **Reaccions**

Les reaccions variaran en funció del material del quadre, a continuació s'adjunta una taula amb els valors a aplicar.

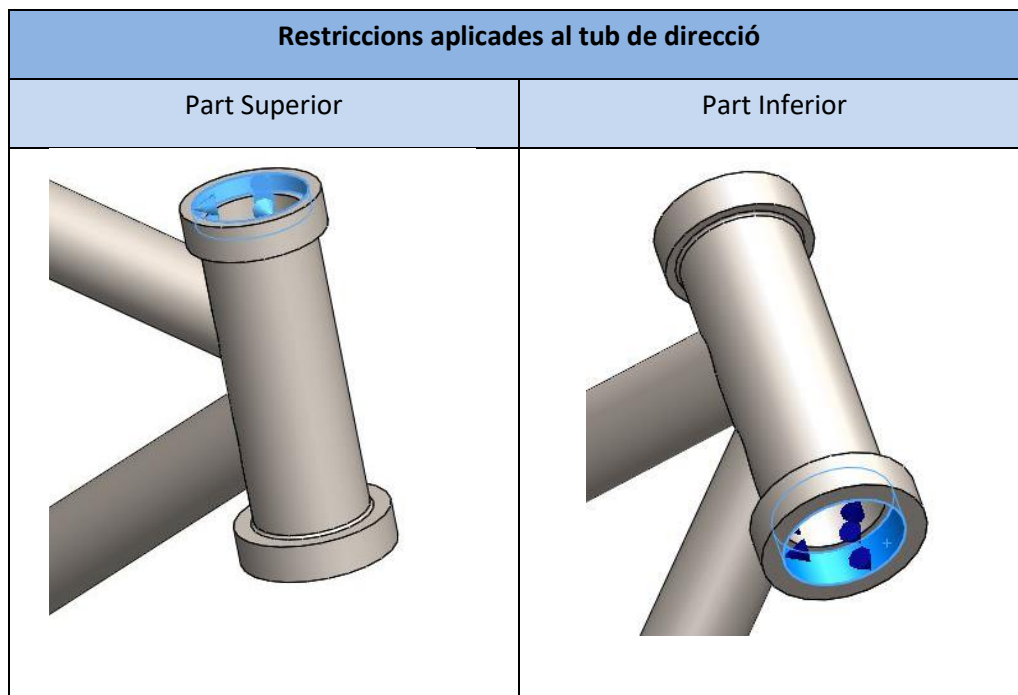
Material del quadre	Acer	Alumini
Roda davantera (R_d) [N]	240,6	230,4
Roda darrere (R_t) [N]	561,4	537,6

Taula 28: resum de les reaccions a aplicar (Cas 2)

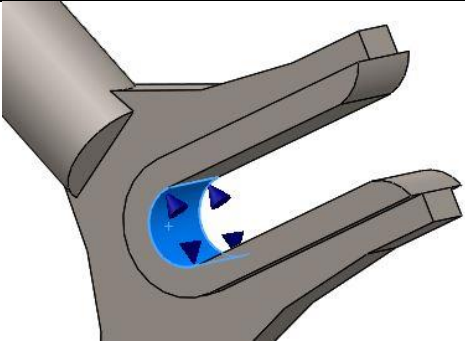
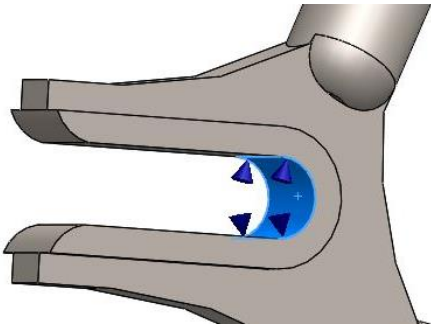
3.3.2.2. Restriccions aplicades al model 3D

Les restriccions aplicades al model 3D del quadre, són exclusivament restriccions de rodament.

A continuació, s'indiquen les zones on s'han aplicat aquestes restriccions.



Taula 29: imatges de les restriccions aplicades al tub de direcció (Cas 2)

Restriccions aplicades a les punteres del quadre	
Puntera Esquerra	Puntera Dreta
	

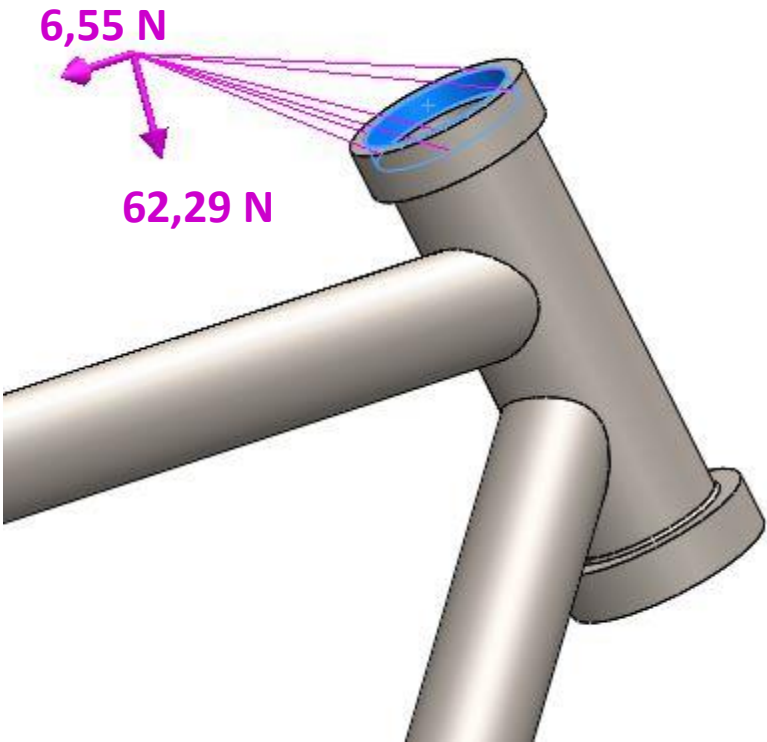
Taula 30: imatges de les restriccions aplicades a les punteres del quadre (Cas 2)

3.3.2.3. Aplicació de les càrregues al model 3D

- Pes aplicat a la banda esquerra del manillar

Pes manillar (esq.)			
Pes a aplicar	Zona aplicació	Valor [N] (Eix x)	Valor [N] (Eix y)
Pes braç (esquerra)	Manillar (esquerra)	6,55	62,29

Taula 31: Pes a la part esquerra del manillar (Cas 2)

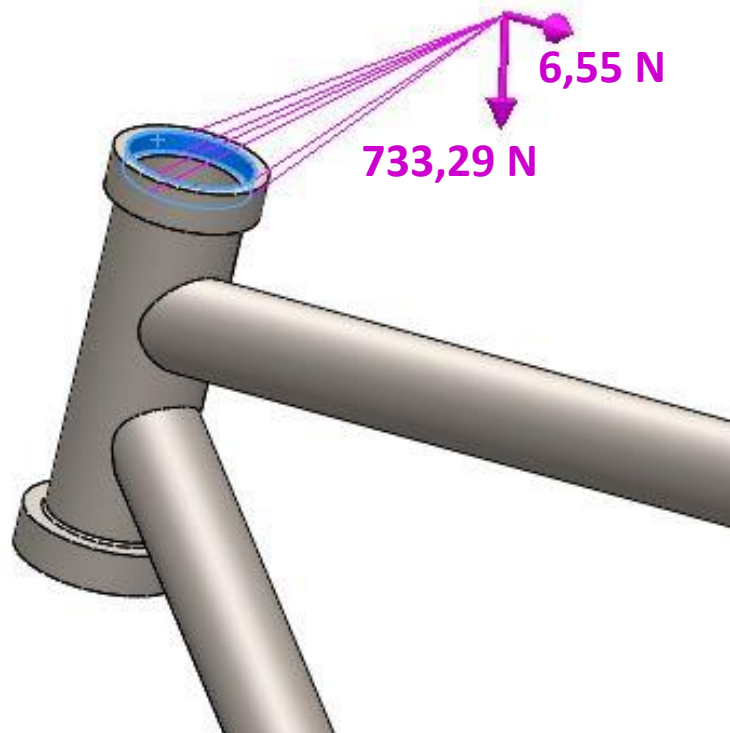


Il·lustració 29: Aplicació del pes a la part esquerra del manillar (Cas 2)

- Forces aplicades a la banda dreta del manillar

Pes manillar (dre.)			
Forces a aplicar	Zona aplicació	Valor [N] (Eix x)	Valor [N] (Eix y)
Pes braç (dret)	Manillar (dreta)	6,55	62,29
Força Equilibri	Manillar (dreta)	0	671
Total a aplicar		6,55	733,29

Taula 32: Forces a la part dreta del manillar (Cas 2)

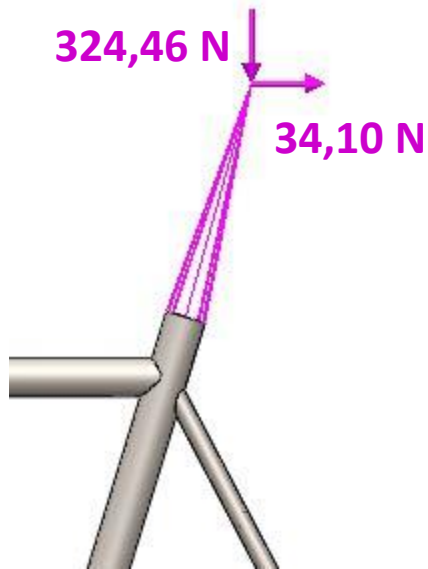


Il·lustració 30: Aplicació de les forces a la part dreta del manillar (Cas 2)

▪ Pes aplicat al seient

Pes seient			
Pes a aplicar	Zona aplicació	Valor [N] (Eix x)	Valor [N] (Eix y)
Pes del tronc	Seient	34,10	324,46

Taula 33: Pes aplicat al seient (Cas 2)

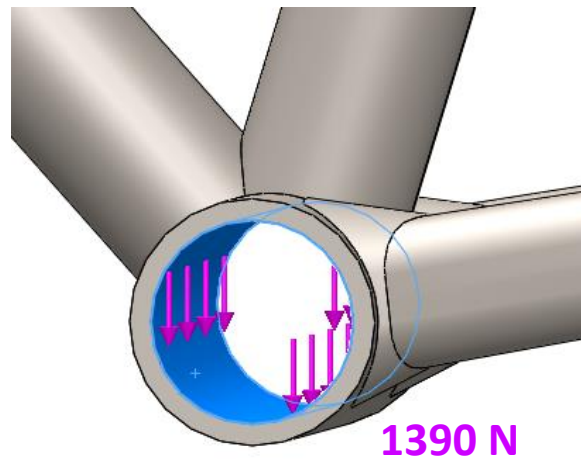


Il·lustració 31: Aplicació del pes al seient (Cas 2)

▪ Forces aplicades al tub de pedalier

Força pedalier		
Forces a aplicar	Zona aplicació	Valor [N]
Pes de les cames	Pedalier	298,5
Força per vèncer les pèrdues	Pedalier	91,5
Força pedaleig	Pedalier	1000
Total a aplicar		1390

Taula 34: Forces al tub de pedalier (Cas 2)

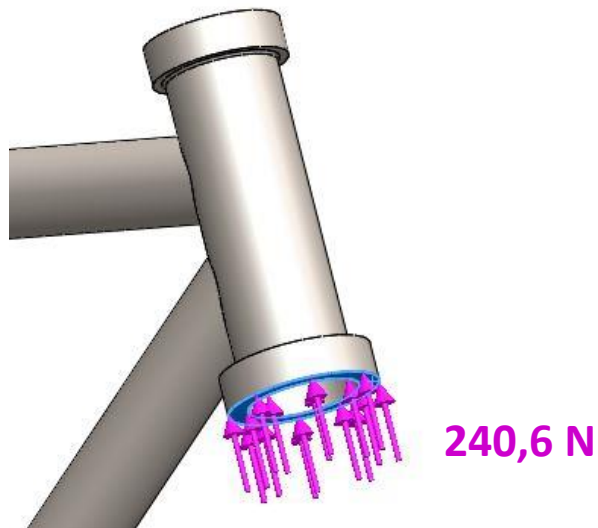


Il·lustració 32: Aplicació de les forces al tub de pedalier (Cas 2)

- Aplicació de les reaccions
 - Quadre Acer
 - Reacció roda davantera

Reacció davant	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda davantera (R_d)	240,6

Taula 35: Reacció roda davantera quadre Acer (Cas 2)

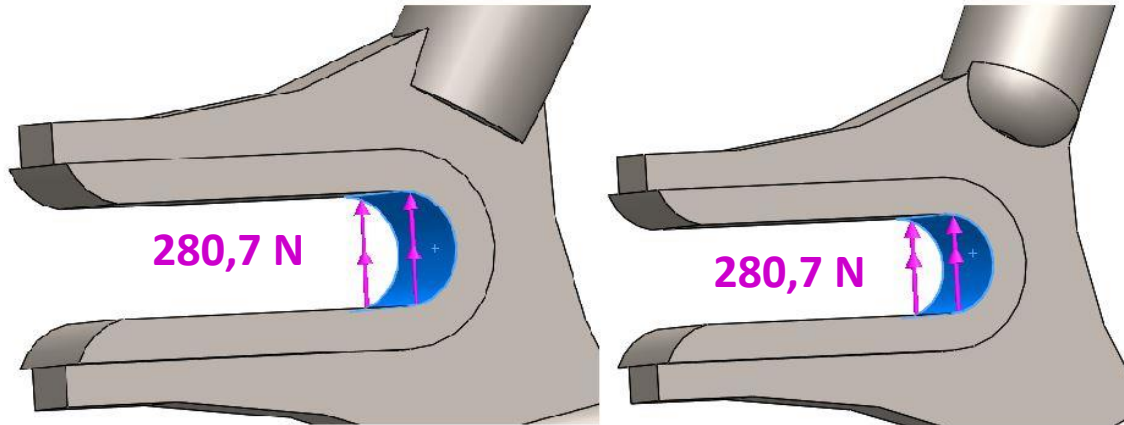


Il·lustració 33: Aplicació reacció roda davantera quadre Acer (Cas 2)

▪ Reacció roda del darrere

Reacció darrere 1 i 2	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda darrere (R_r)	561,4

Taula 36: Reacció roda darrere quadre Acer (Cas 2)



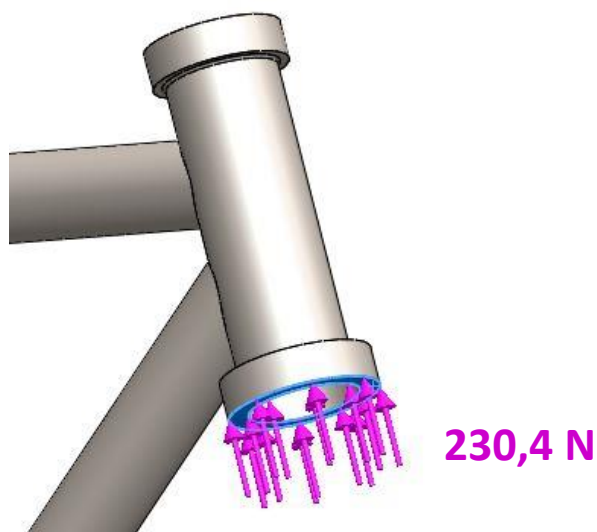
Il·lustració 34: Aplicació reacció roda darrere quadre Acer puntera esquerra i dreta (Cas 2)

○ Quadre Alumini

▪ Reacció roda davantera

Reacció davant	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda davantera (R_d)	230,4

Taula 37: Reacció roda davantera quadre Alumini (Cas 2)

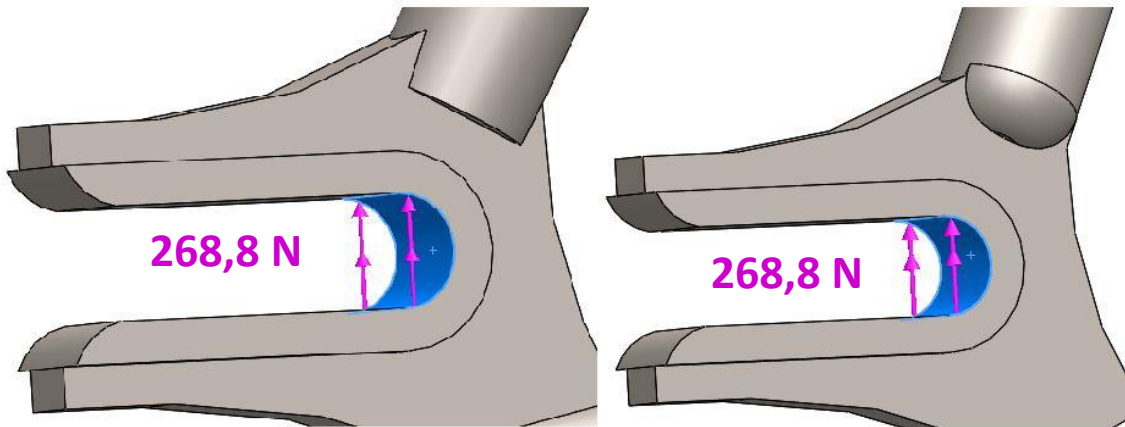


Il·lustració 35: Aplicació reacció roda davantera quadre Alumini (Cas 2)

- Reacció roda del darrere

Reacció darrere 1 i 2	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda darrere (R_i)	537,6

Taula 38: Reacció roda darrere quadre Alumini (Cas 2)



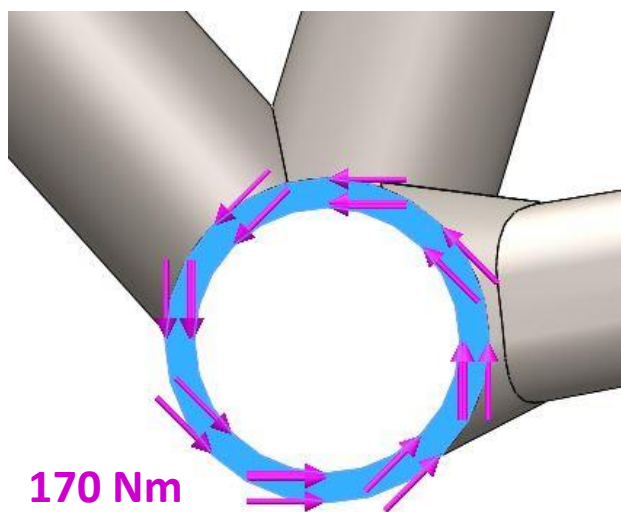
Il·lustració 36: Aplicació reacció roda darrere quadre Alumini puntera esquerra i dreta (Cas 2)

3.3.2.4. Aplicació dels moments al model 3D

- Moment 1

Tipus de moment	Valor [Nm]
Moment 1 (M_1)	170

Taula 39: Valor del moment 1 (Cas 2)

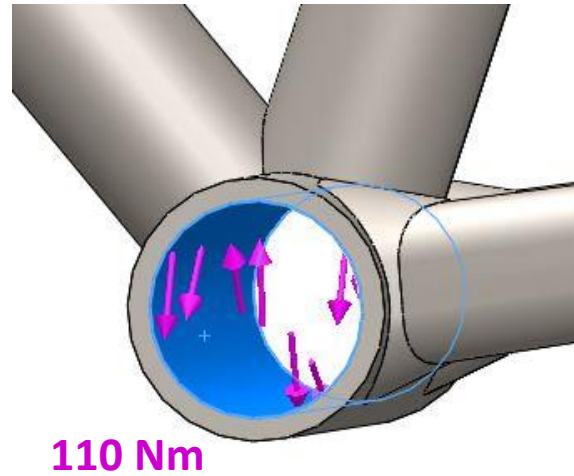


Il·lustració 37: Aplicació del moment 1 (Cas 2)

▪ Moment 2

Tipus de moment	Valor [Nm]
Moment 2 (M_2)	110

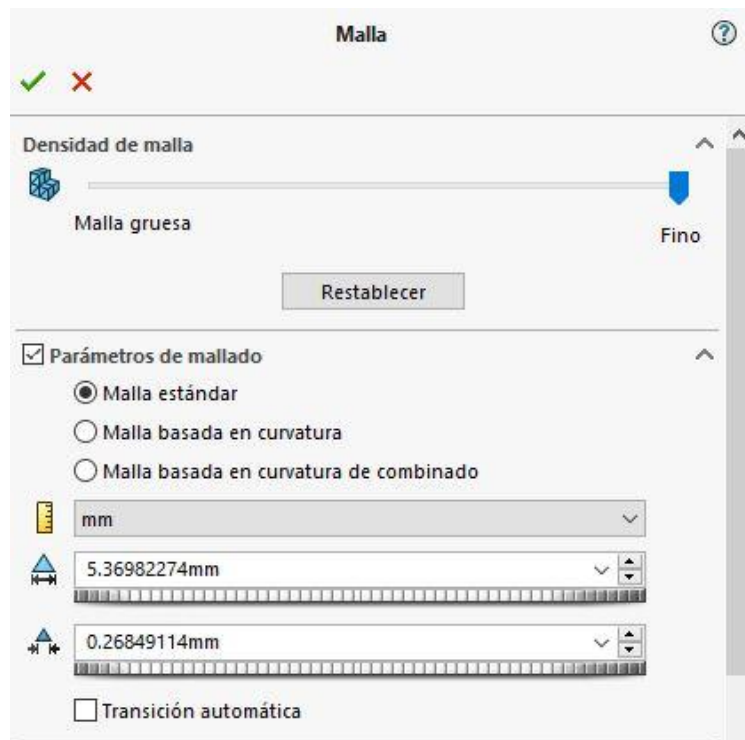
Taula 40: Valor del moment 2 (Cas 2)



Il·lustració 38: Aplicació del moment 2 (Cas 2)

3.3.2.5. Propietats del mallat

A nivell del mallat, s'ha establert una densitat de malla fina. Això implica un número major de punts a analitzar i, com a conseqüència, uns resultats més acurats.



Il·lustració 39: propietats del mallat (Cas 2)

A continuació es mostra una imatge amb el mallat del quadre.



Il·lustració 40: mallat del model 3D (Cas 2)

Tal i com es pot observar a la imatge superior, Solidworks aplica un mallat uniforme a tot el quadre. Observant la il·lustració 39, s'ha escollit una densitat de malla fina que es tradueix en 100817 nodes i 52521 elements. Aquest número de nodes i elements ens proporciona una resolució suficient per a fer front a l'anàlisi.

3.3.3. Cas 3: ciclista pujant una pendent de peu

Per aquest tercer cas d'estudi, es simula una situació real de treball, sense ser un pitjor cas, on el ciclista es troba dempeus a la bicicleta mentre circula a velocitat constant d'ascensió per un terreny amb un pendent del 10%.



Il·lustració 41: Imatge il·lustrativa del cas 3 d'estudi. Font: *La Ingeniería de la bicicleta*.

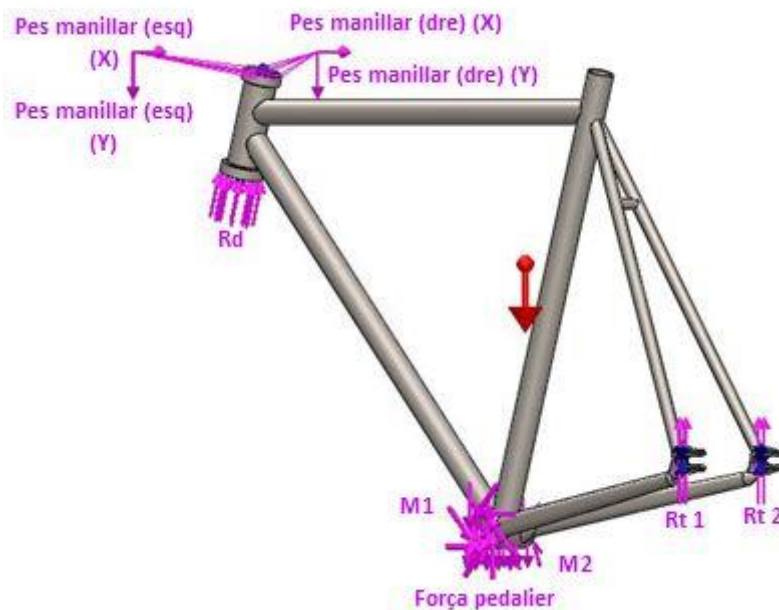
3.3.3.1. Resum de forces i moments a aplicar al cas 3

A continuació, s'especifica el punt d'aplicació de les diferents forces presents al quadre en aquest cas 3. Per aquest tercer cas, el pes del ciclista quedarà repartit en les parts que es poden veure a continuació:

- Manillar
- Pedalier

Un cop especificades les zones d'aplicació del pes del ciclista, es presenten les càrregues a aplicar al model 3D així com la zona d'aplicació de les mateixes. Per a més detalls de l'obtenció de les dades, càlculs de les forces i comprovació del sumatori de les forces verticals, dirigiu-vos a l'annex 1.

- Aplicació de les càrregues al model 3D



Il·lustració 42: aplicació de totes les càrregues al model 3D (Cas 3)

- Resum de forces a aplicar als dos quadres

Tipus de Força/Pes a aplicar	Zona d'aplicació	Valor [N]	Valor Component X [N]	Valor Component Y [N]
Pes braç (esquerra)	Manillar (esquerra)	117	12,23	116,36
Pes braç (dret)	Manillar (dreta)	117	12,23	116,36
Força Equilibri	Manillar (dreta)	617		617
Pes de les cames	Pedalier	516		516
Força per vèncer les pèrdues	Pedalier	91,5		91,5
Força pedaleig	Pedalier	1000		1000

Taula 41: resum de forces i pesos a aplicar (Cas 3)

- Moments deguts al pedaleig

Tipus de moment	Valor [Nm]
Moment 1 (M_1)	170
Moment 2 (M_2)	110

Taula 42: resum dels moments a aplicar (Cas 3)

- Reaccions

Les reaccions variaran en funció del material del quadre, a continuació s'adjunta una taula amb els valors a aplicar.

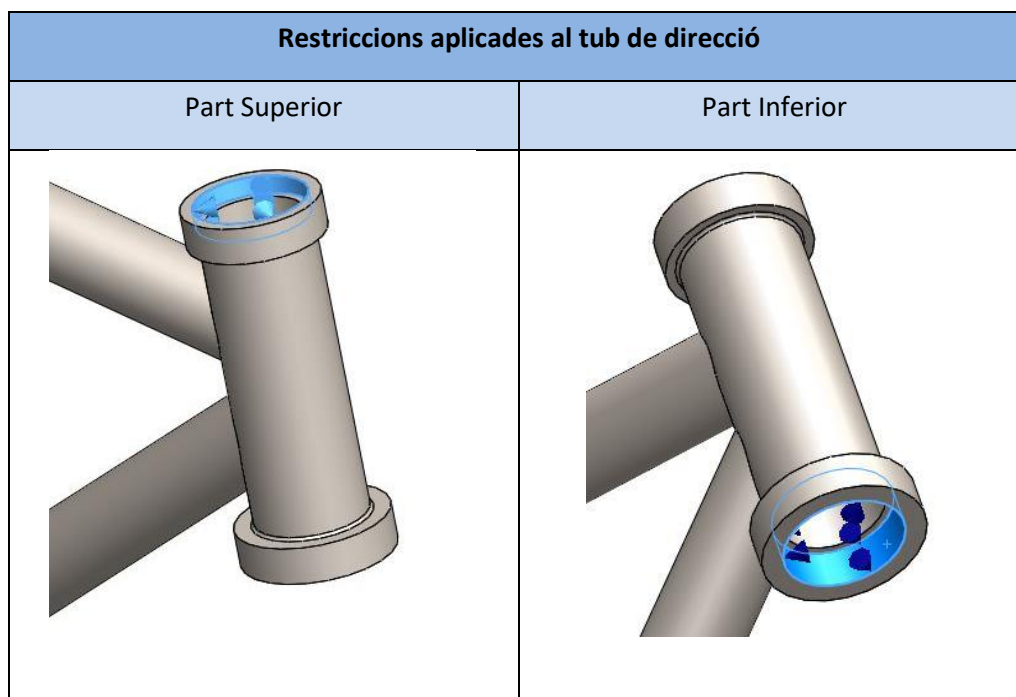
Material del quadre	Acer	Alumini
Roda davantera (R_d) [N]	240,6	230,4
Roda darrere (R_t) [N]	561,4	537,6

Taula 43: resum de les reaccions a aplicar (Cas 3)

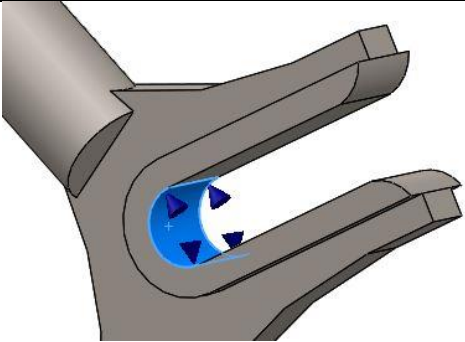
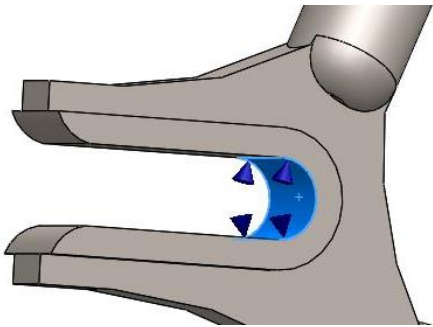
3.3.3.2. Restriccions aplicades al model 3D

Les restriccions aplicades al model 3D del quadre, són exclusivament restriccions de rodament.

A continuació, s'indiquen les zones on s'han aplicat aquestes restriccions.



Taula 44: imatges de les restriccions aplicades al tub de direcció (Cas 3)

Restriccions aplicades a les punteres del quadre	
Puntera Esquerra	Puntera Dreta
	

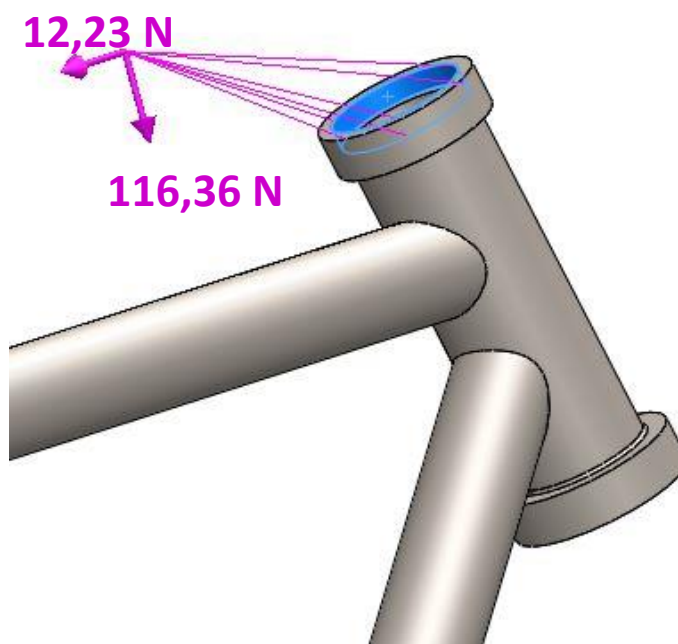
Taula 45: imatges de les restriccions aplicades a les punteres del quadre (Cas 3)

3.3.3.3. Aplicació de les càrregues al model 3D

- Pes aplicat a la banda esquerra del manillar

Pes manillar (esq.)			
Pes a aplicar	Zona aplicació	Valor [N] (Eix x)	Valor [N] (Eix y)
Pes braç (esquerra)	Manillar (esquerra)	12,23	116,36

Taula 46: Pes a la part esquerra del manillar (Cas 3)

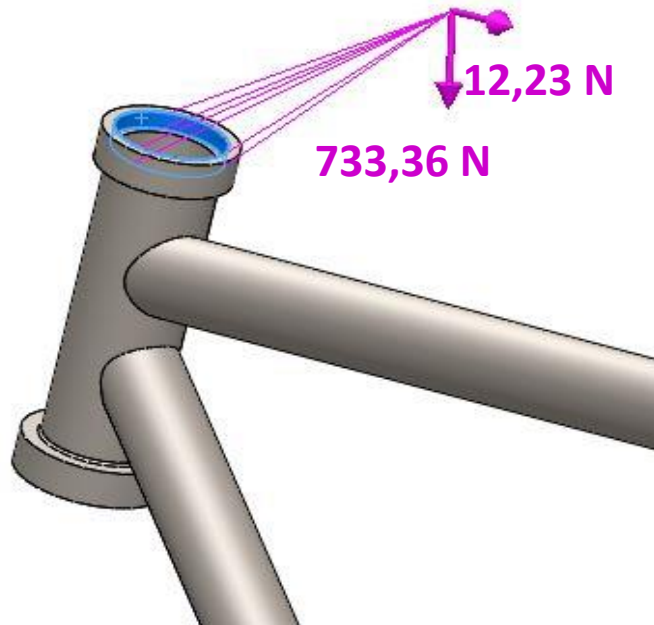


Il·lustració 43: Aplicació del pes a la part esquerra del manillar (Cas 3)

- Forces aplicades a la banda dreta del manillar

Pes manillar (dre.)			
Forces a aplicar	Zona aplicació	Valor [N] (Eix x)	Valor [N] (Eix y)
Pes braç (dret)	Manillar (dreta)	12,23	116,36
Força Equilibri	Manillar (dreta)	0	617
Total a aplicar		12,23	733,36

Taula 47: Forces a la part dreta del manillar (Cas 3)

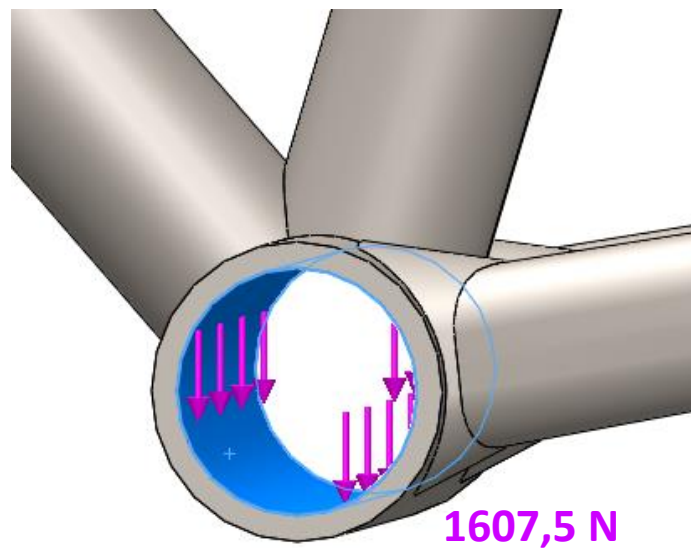


Il·lustració 44: Aplicació de les forces a la part dreta del manillar (Cas 3)

- Forces aplicades al tub de pedalier

Força pedalier		
Forces a aplicar	Zona aplicació	Valor [N]
Pes de les cames	Pedalier	516
Força per vèncer les pèrdues	Pedalier	91,5
Força pedaleig	Pedalier	1000
Total a aplicar		1607,5

Taula 48: Forces al tub de pedalier (Cas 3)



Il·lustració 45: Aplicació de les forces al tub de pedalier (Cas 3)

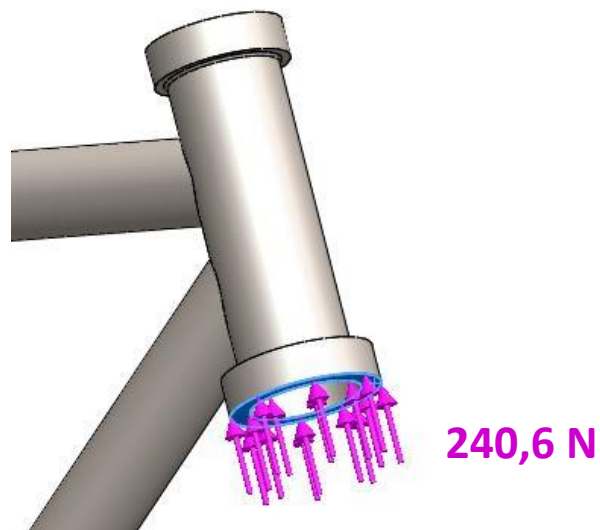
▪ Aplicació de les reaccions

○ Quadre Acer

▪ Reacció roda davantera

Reacció davant	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda davantera (R_d)	240,6

Taula 49: Reacció roda davantera quadre Acer (Cas 3)

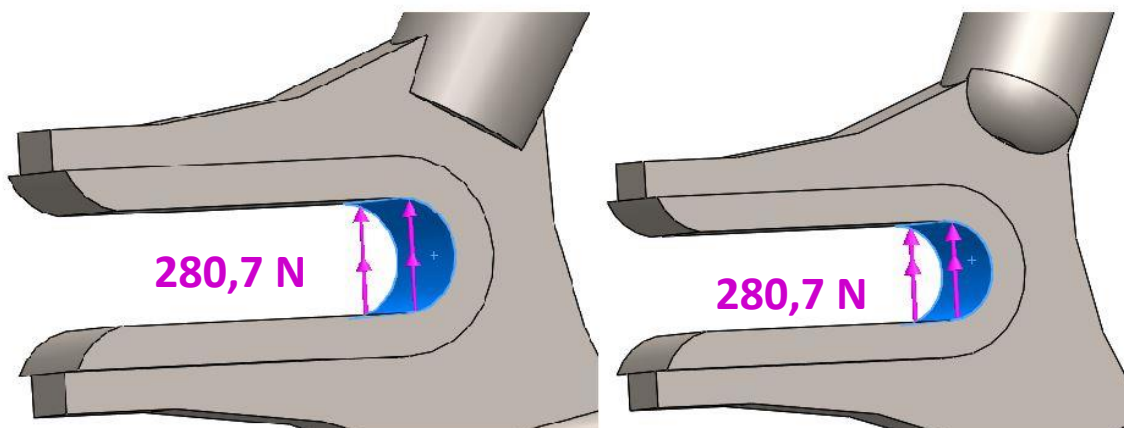


Il·lustració 46: Aplicació reacció roda davantera quadre Acer (Cas 3)

▪ Reacció roda del darrere

Reacció darrere 1 i 2	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda darrere (R_t)	561,4

Taula 50: Reacció roda darrere quadre Acer (Cas 3)



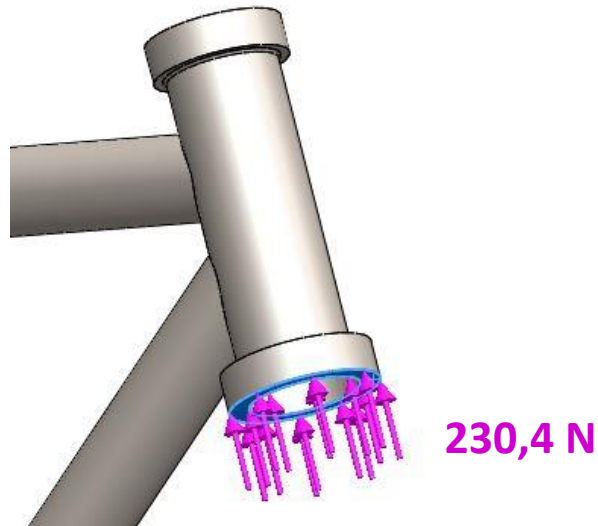
Il·lustració 47: Aplicació reacció roda darrere quadre Acer puntera esquerra i dreta (Cas 3)

○ Quadre Alumini

▪ Reacció roda davantera

Reacció davant	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda davantera (R_d)	230,4

Taula 51: Reacció roda davantera quadre Alumini (Cas 3)

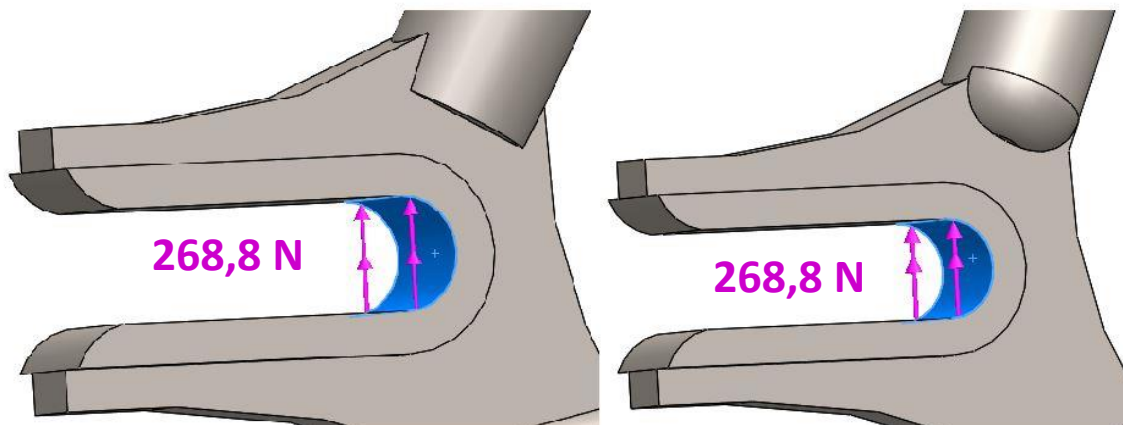


Il·lustració 48: Aplicació reacció roda davantera quadre Alumini (Cas 3)

▪ Reacció roda del darrere

Reacció darrere 1 i 2	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda darrere (R_i)	537,6

Taula 52: Reacció roda darrere quadre Alumini (Cas 3)



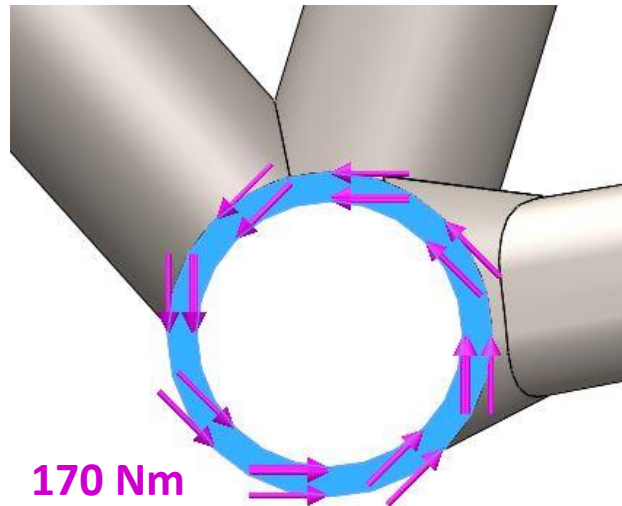
Il·lustració 49: Aplicació reacció roda darrere quadre Alumini puntera esquerra i dreta (Cas 3)

3.3.3.4. Aplicació dels moments al model 3D

- Moment 1

Tipus de moment	Valor [Nm]
Moment 1 (M_1)	170

Taula 53: Valor del moment 1 (Cas 3)

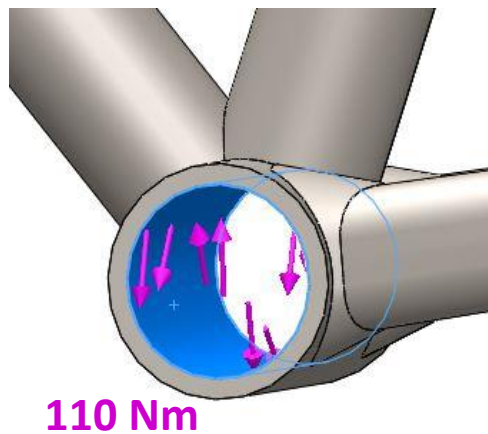


Il·lustració 50: Aplicació del moment 1 (Cas 3)

- Moment 2

Tipus de moment	Valor [Nm]
Moment 2 (M_2)	110

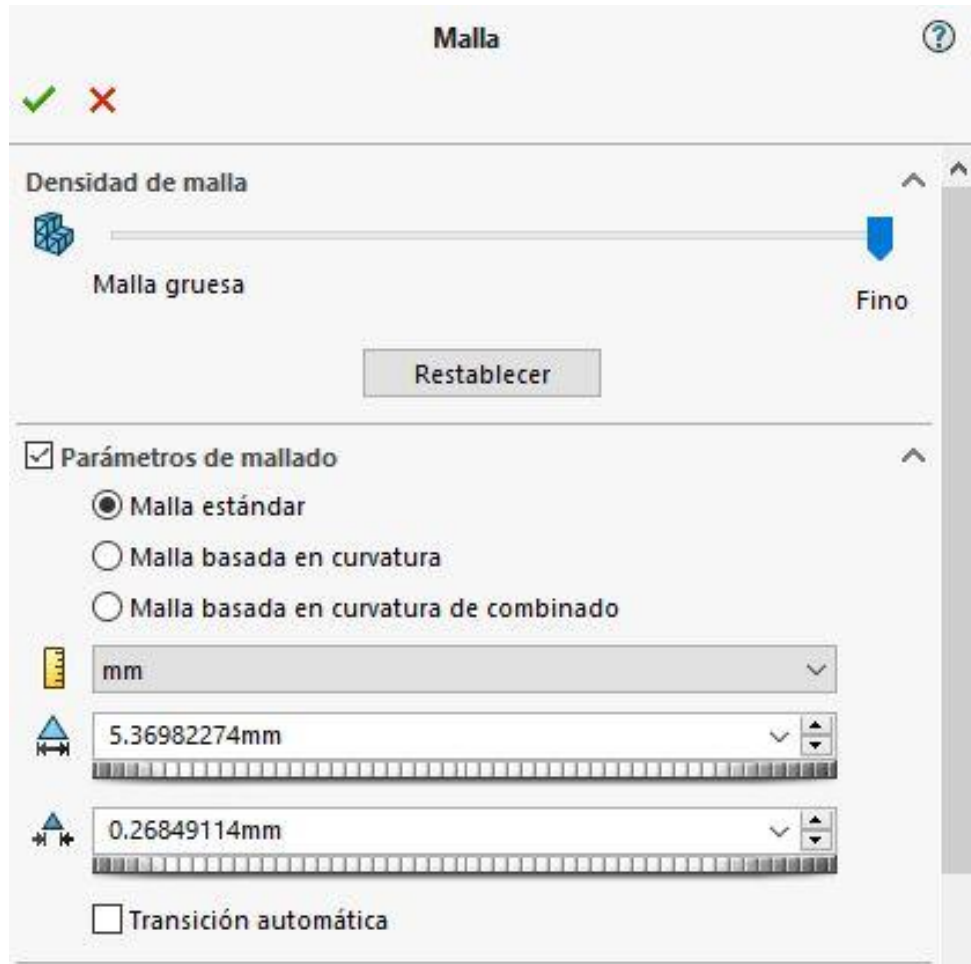
Taula 54: Valor del moment 2 (Cas 3)



Il·lustració 51: Aplicació del moment 2 (Cas 3)

3.3.3.5. Propietats del mallat

A nivell del mallat, s'ha establert una densitat de malla fina. Això implica un número major de punts a analitzar i, com a conseqüència, uns resultats més acurats.



Il·lustració 52: propietats del mallat (Cas 3)

A continuació es mostra una imatge amb el mallat del quadre.



Il·lustració 53: mallat del model 3D (Cas 3)

Tal i com es pot observar a la imatge superior, Solidworks aplica un mallat uniforme a tot el quadre. Observant la il·lustració 52, s'ha escollit una densitat de malla fina que es tradueix en 100817 nodes i 52521 elements. Aquest número de nodes i elements ens proporciona una resolució suficient per a fer front a l'anàlisi.

3.3.4. Cas 4: ciclista pujant una pendent de peu (Cas més desfavorable)

Per aquest quart i últim cas d'estudi, es simula una situació real de treball que a nivell de càrregues resulta ser el cas més desfavorable de tots. El ciclista, té un major pes comparat amb els tres casos anteriors i es troba dempeus a la bicicleta mentre circula a velocitat constant d'ascensió per un terreny amb un pendent del 10%.



Il·lustració 54: Imatge il·lustrativa del cas 4 d'estudi. Font: *La Ingeniería de la bicicleta*.

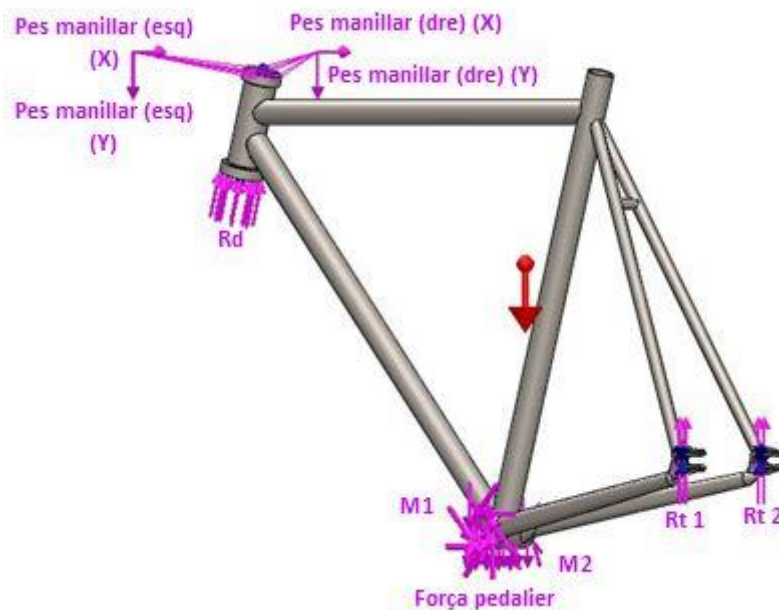
3.3.4.1. Resum de forces i moments a aplicar al cas 4

A continuació, s'especifica el punt d'aplicació de les diferents forces presents al quadre en aquest cas 4. Per aquest quart cas, el pes del ciclista quedarà repartit en les parts que es poden veure a continuació:

- Manillar
- Pedalier

Un cop especificades les zones d'aplicació del pes del ciclista, es presenten les càrregues a aplicar al model 3D així com la zona d'aplicació de les mateixes. Per a més detalls de l'obtenció de les dades, càlculs de les forces i comprovació del sumatori de les forces verticals, dirigiu-vos a l'annex 1.

- Aplicació de les càrregues al model 3D



Il·lustració 55: aplicació de totes les càrregues al model 3D (Cas 4)

- Resum de forces a aplicar als dos quadres

Tipus de Força/Pes a aplicar	Zona d'aplicació	Valor [N]	Valor Component X [N]	Valor Component Y [N]
Pes braç (esquerra)	Manillar (esquerra)	156	16,31	155,15
Pes braç (dret)	Manillar (dreta)	156	16,31	155,15
Força Equilibri	Manillar (dreta)	1220		1220
Pes de les cames	Pedalier	688		688
Força per vèncer les pèrdues	Pedalier	91,5		91,5
Força pedaleig	Pedalier	1875		1875

Taula 55: resum de forces i pesos a aplicar (Cas 4)

▪ Moments deguts al pedaleig

Tipus de moment	Valor [Nm]
Moment 1 (M_1)	318,75
Moment 2 (M_2)	206,25

Taula 56: resum dels moments a aplicar (Cas 4)

▪ Reaccions

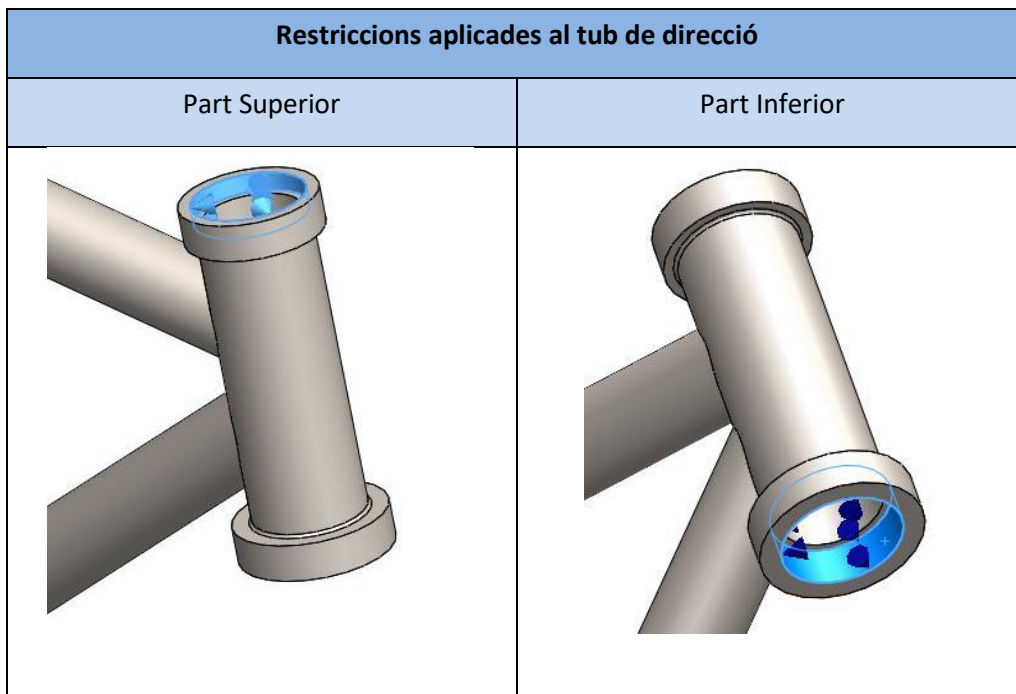
Les reaccions variaran en funció del material del quadre, a continuació s'adjunta una taula amb els valors a aplicar.

Material del quadre	Acer	Alumini
Roda davantera (R_d) [N]	315,6	305,4
Roda darrere (R_t) [N]	736,4	712,6

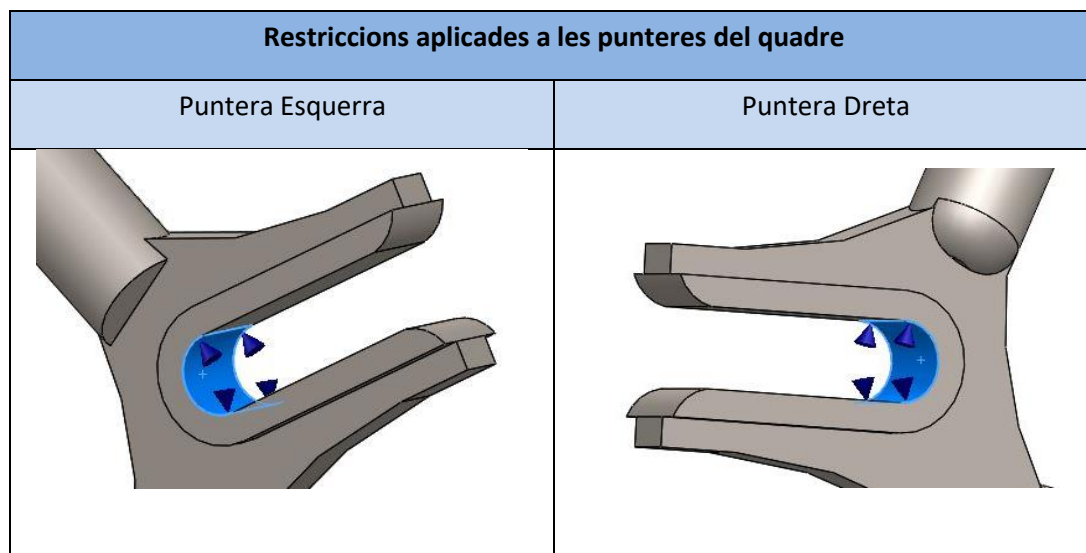
Taula 57: resum de les reaccions a aplicar (Cas 4)

3.3.4.2. Restriccions aplicades al model 3D

Les restriccions aplicades al model 3D del quadre, són exclusivament restriccions de rodament. A continuació, s'indiquen les zones on s'han aplicat aquestes restriccions.



Taula 58: imatges de les restriccions aplicades al tub de direcció (Cas 4)



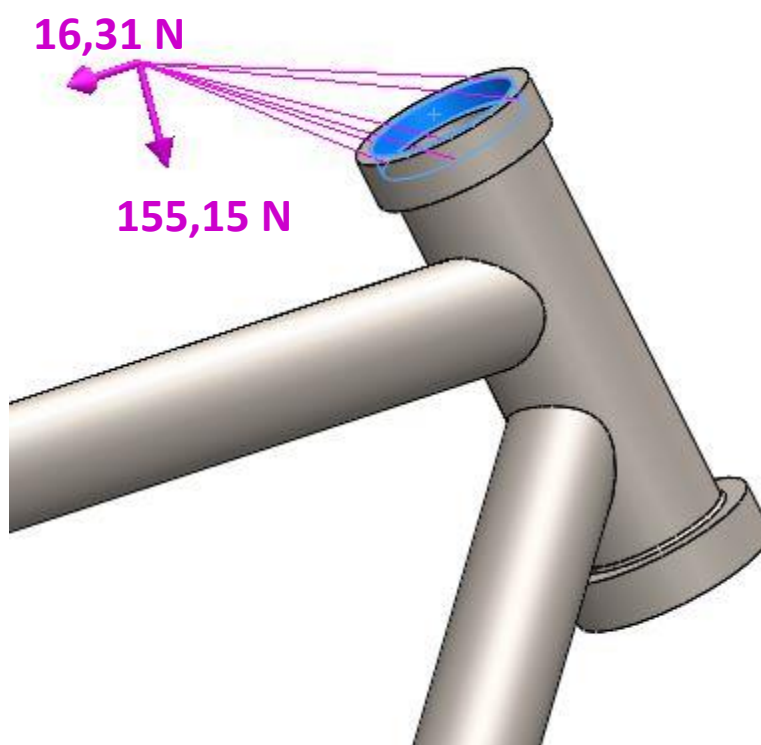
Taula 59: imatges de les restriccions aplicades a les punteres del quadre (Cas 4)

3.3.4.3. Aplicació de les càrregues al model 3D

- Pes aplicat a la banda esquerra del manillar

Pes manillar (esq.)			
Pes a aplicar	Zona aplicació	Valor [N] (Eix x)	Valor [N] (Eix y)
Pes braç (esquerra)	Manillar (esquerra)	16,31	155,15

Taula 60: Pes a la part esquerra del manillar (Cas 4)

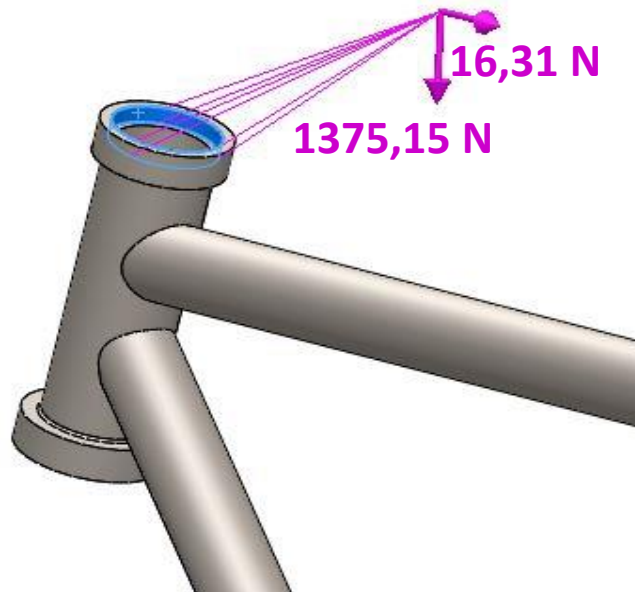


Il·lustració 56: Aplicació del pes a la part esquerra del manillar (Cas 4)

- Forces aplicades a la banda dreta del manillar

Pes manillar (dre.)			
Forces a aplicar	Zona aplicació	Valor [N] (Eix x)	Valor [N] (Eix y)
Pes braç (dret)	Manillar (dreta)	16,31	155,15
Força Equilibri	Manillar (dreta)	0	1220
Total a aplicar		16,31	1375,15

Taula 61: Forces a la part dreta del manillar (Cas 4)

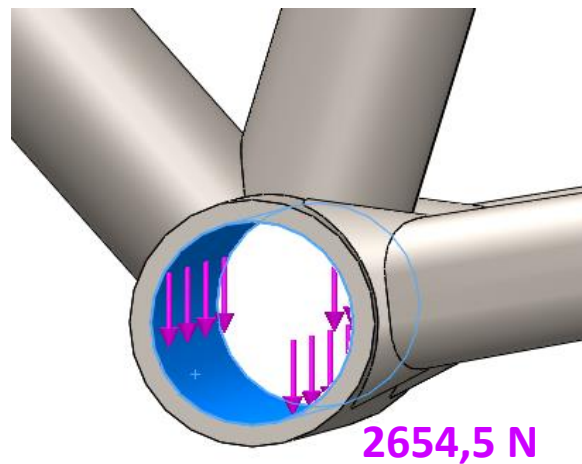


Il·lustració 57: Aplicació de les forces a la part dreta del manillar (Cas 4)

- Forces aplicades al tub de pedalier

Força pedalier		
Forces a aplicar	Zona aplicació	Valor [N]
Pes de les cames	Pedalier	688
Força per vèncer les pèrdues	Pedalier	91,5
Força pedaleig	Pedalier	1875
Total a aplicar		2654,5

Taula 62: Forces al tub de pedalier (Cas 4)

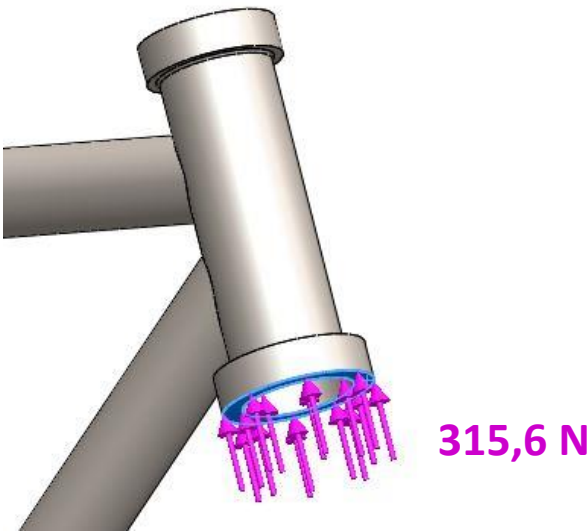


Il·lustració 58: Aplicació de les forces al tub de pedalier (Cas 4)

- Aplicació de les reaccions
 - Quadre Acer
 - Reacció roda davantera

Reacció davant	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda davantera (R_d)	315,6

Taula 63: Reacció roda davantera quadre Acer (Cas 4)

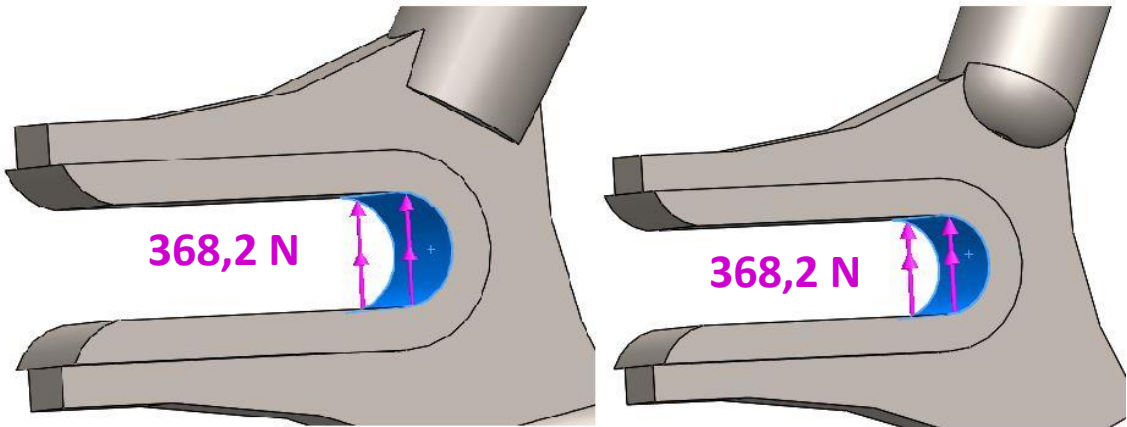


Il·lustració 59: Aplicació reacció roda davantera quadre Acer (Cas 4)

- Reacció roda del darrere

Reacció darrere 1 i 2	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda darrere (R_i)	736,4

Taula 64: Reacció roda darrere quadre Acer (Cas 4)

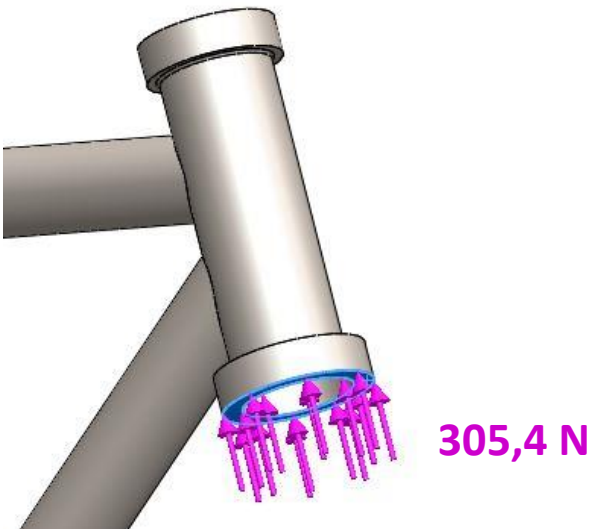


Il·lustració 60: Aplicació reacció roda darrere quadre Acer puntera esquerra i dreta (Cas 4)

- Quadre Alumini
 - Reacció roda davantera

Reacció davant	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda davantera (R_d)	305,4

Taula 65: Reacció roda davantera quadre Alumini (Cas 4)

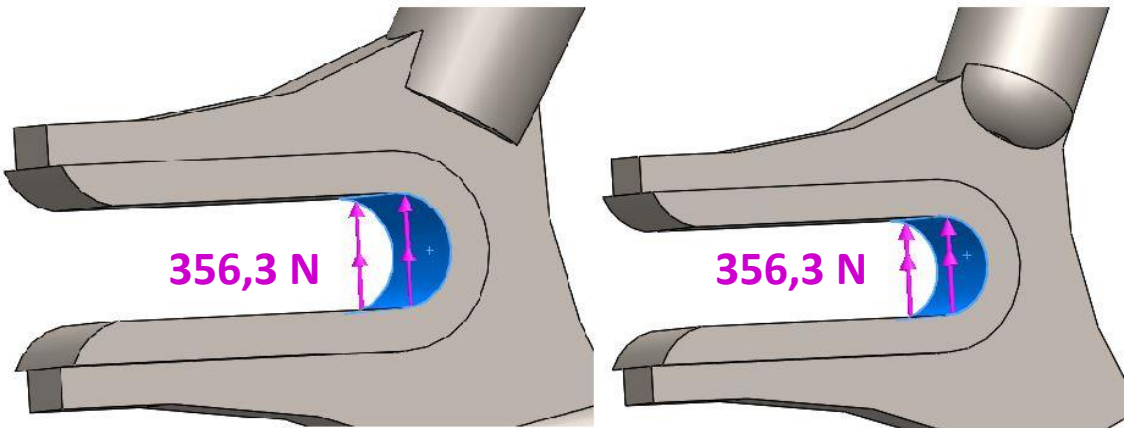


Il·lustració 61: Aplicació reacció roda davantera quadre Alumini (Cas 4)

- Reacció roda del darrere

Reacció darrere 1 i 2	
Nomenclatura	Valor [N]
Roda darrere (R_i)	712,6

Taula 66: Reacció roda darrere quadre Alumini (Cas 4)



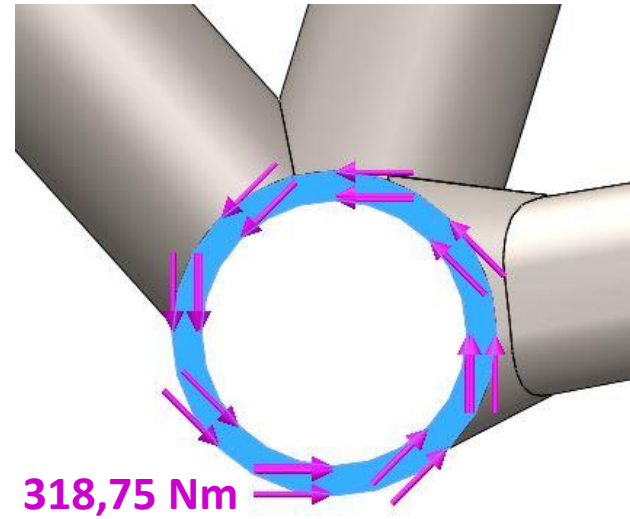
Il·lustració 62: Aplicació reacció roda darrere quadre Alumini puntera esquerra i dreta (Cas 4)

3.3.4.4. Aplicació dels moments al model 3D

- Moment 1

Tipus de moment	Valor [Nm]
Moment 1 (M_1)	318,75

Taula 67: Valor del moment 1 (Cas 4)

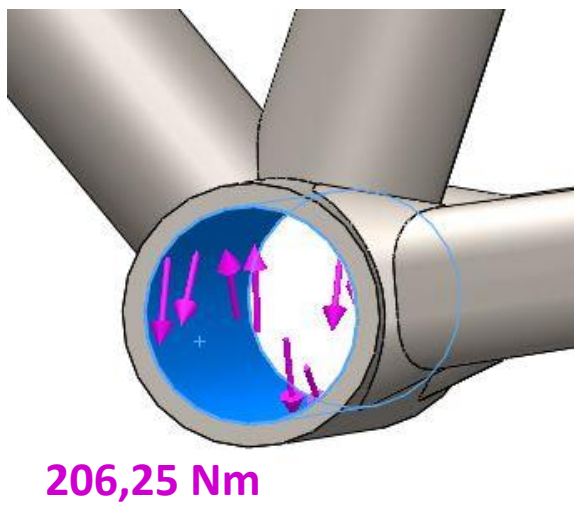


Il·lustració 63: Aplicació del moment 1 (Cas 4)

- Moment 2

Tipus de moment	Valor [Nm]
Moment 2 (M_2)	206,25

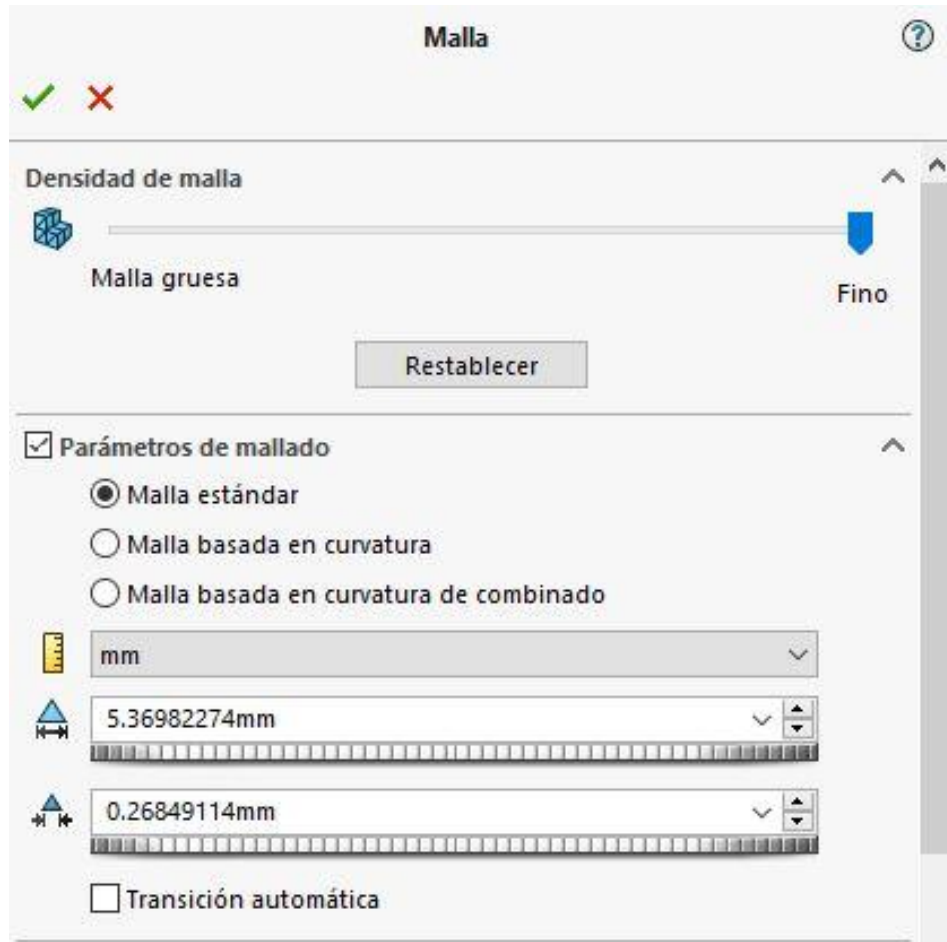
Taula 68: Valor del moment 2 (Cas 4)



Il·lustració 64: Aplicació del moment 2 (Cas 4)

3.3.4.5. Propietats del mallat

A nivell del mallat, s'ha establert una densitat de malla fina. Això implica un número major de punts a analitzar i, com a conseqüència, uns resultats més acurats.



Il·lustració 65: propietats del mallat (Cas 4)

A continuació es mostra una imatge amb el mallat del quadre.



Il·lustració 66: mallat del model 3D (Cas 4)

Tal i com es pot observar a la imatge superior, Solidworks aplica un mallat uniforme a tot el quadre. Observant la il·lustració 65, s'ha escollit una densitat de malla fina que es tradueix en 100817 nodes i 52521 elements. Aquest número de nodes i elements ens proporciona una resolució suficient per a fer front a l'anàlisi.

4. Anàlisi dels resultats

A continuació, es presenten els resultats dels anàlisis FEM pel quadre d'Acer i d'Alumini. Per a cadascun dels casos especificats al capítol anterior, es presenten els resultats amb una taula comparativa per tal d'observar les diferències que existeixen entre els materials dels quadres.

4.1. Resultats del Cas 1

4.1.1. Taula comparativa dels resultats

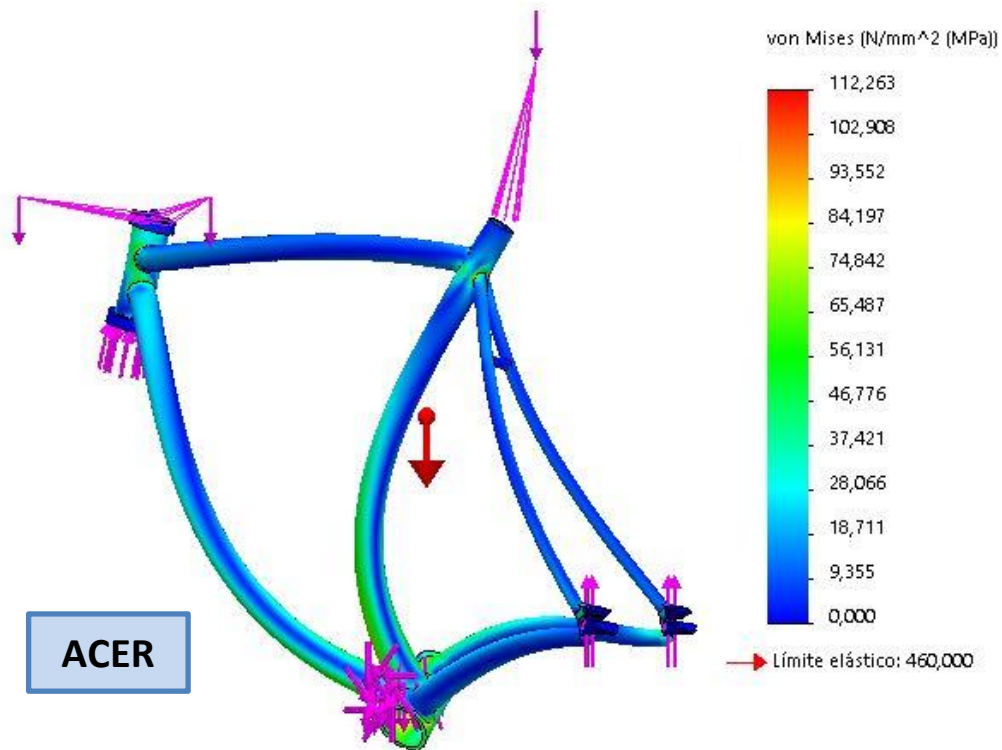
A continuació s'exposen els resultats obtinguts amb Solidworks un cop assajat el Cas 1 d'estudi. A la taula adjunta es poden observar els valors màxims de tensions, desplaçaments, deformacions unitàries i el valor mínim del Factor de seguretat.

		Resultats cas 1	
		ACER	ALUMINI
Tensions [MPa]	Màxim	112,263	111,934
Desplaçaments [mm]	Màxim	0,443	1,315
Deformacions unitàries	Màxim	$4,373 \times 10^{-4}$	$1,331 \times 10^{-3}$
Factor de seguretat	Mínim	4,098	2,457

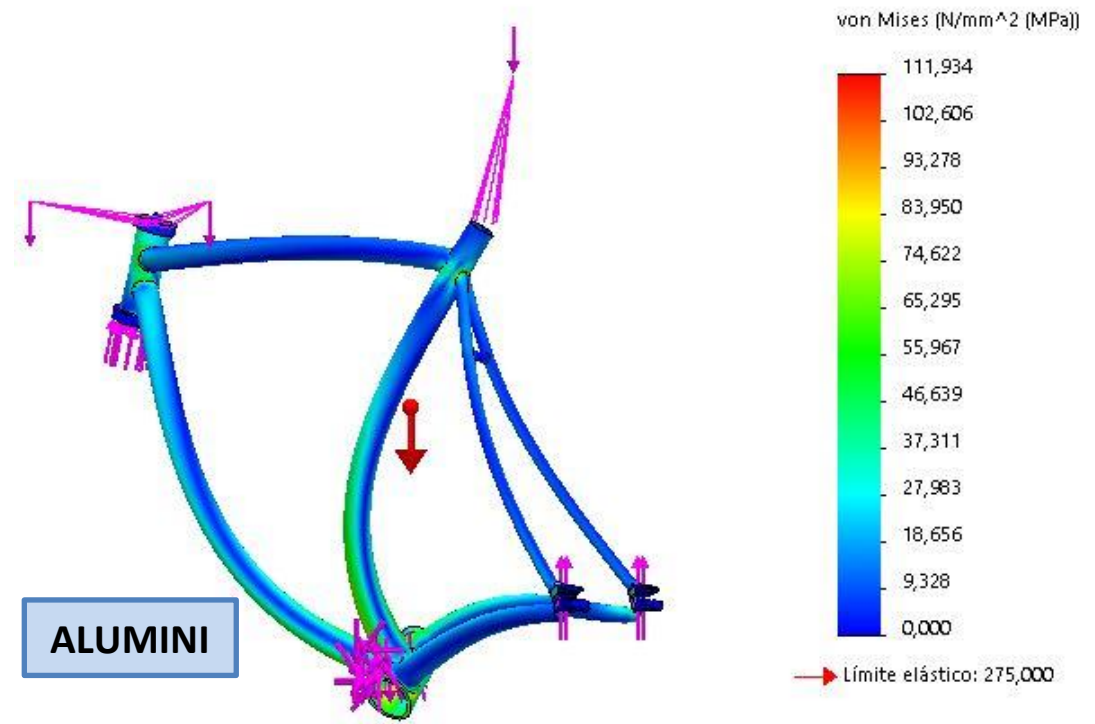
Taula 69: taula comparativa de resultats (Cas 1)

4.1.2. Gràfiques comparatives entre els dos quadres (Cas 1)

4.1.2.1. Gràfic de Tensions

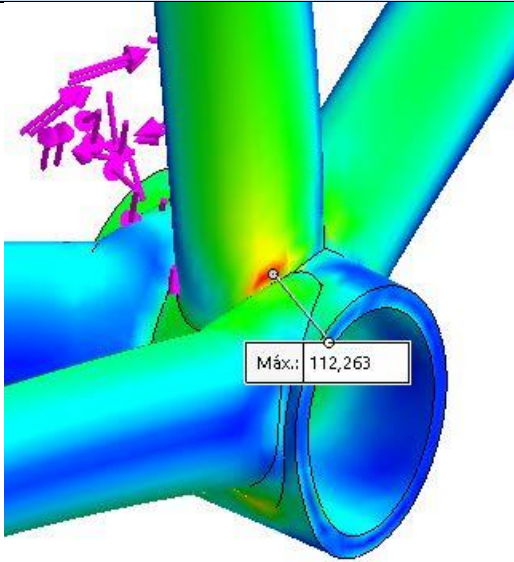
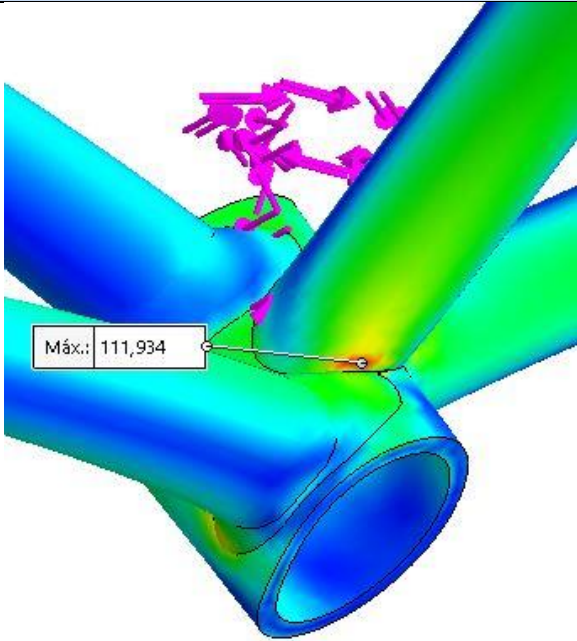


Il·lustració 67: gràfic de tensions al quadre d'acer (Cas 1)



Il·lustració 68: gràfic de tensions al quadre d'alumini (Cas 1)

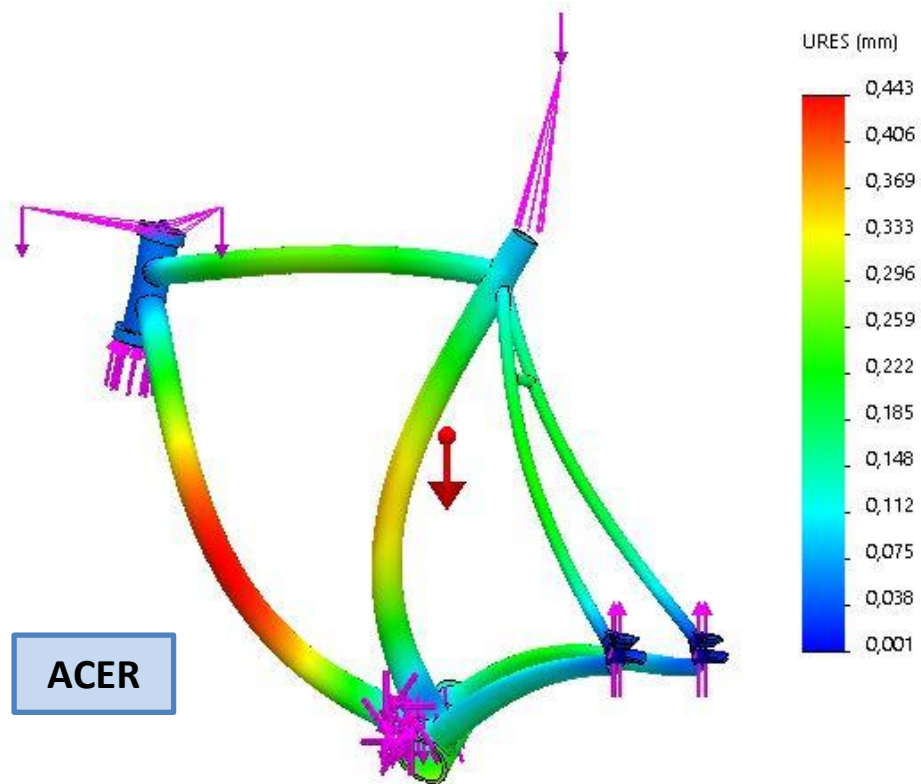
Un cop mostrades les gràfiques de tensions màximes obtingudes amb Solidworks, s'adjunta una taula on s'observa la localització de la tensió màxima obtinguda al quadre d'acer i al d'alumini.

Localització de les tensions màximes (Cas 1)	
Quadre acer	Quadre alumini
	

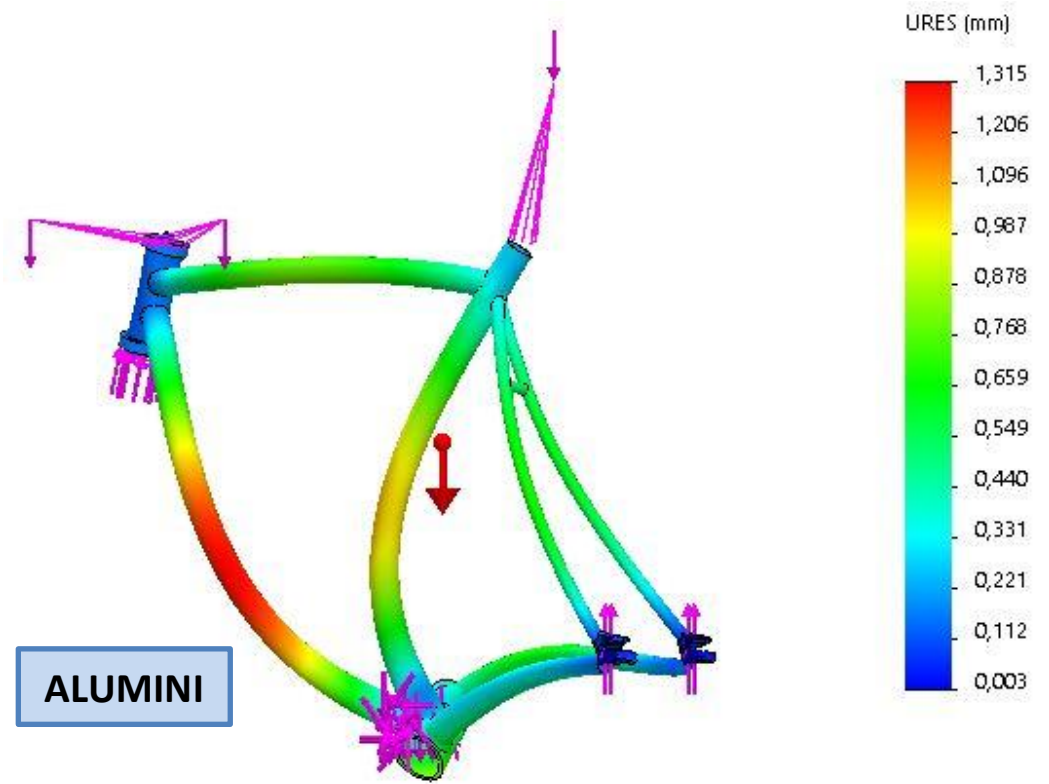
Taula 70: localització tensions màximes (Cas 1)

En aquest primer cas d'estudi, la localització de les tensions màximes al quadre es situa a la unió entre el tub del seient i el tub del pedalier, més concretament, es situa a la banda dreta del tub del seient. El motiu d'aquesta localització, es deu a que el ciclista es troba assegut al seient produint així una compressió al tub del seient i, alhora, la força de pedaleig queda aplicada al tub del pedalier juntament amb els moments deguts al pedaleig, situats a la banda esquerra del tub del pedalier. Aquest conjunt de forces i moments aplicats alhora, provoquen que la part dreta del tub del seient sigui la zona més tensionada als dos casos.

4.1.2.2. Gràfic de desplaçaments

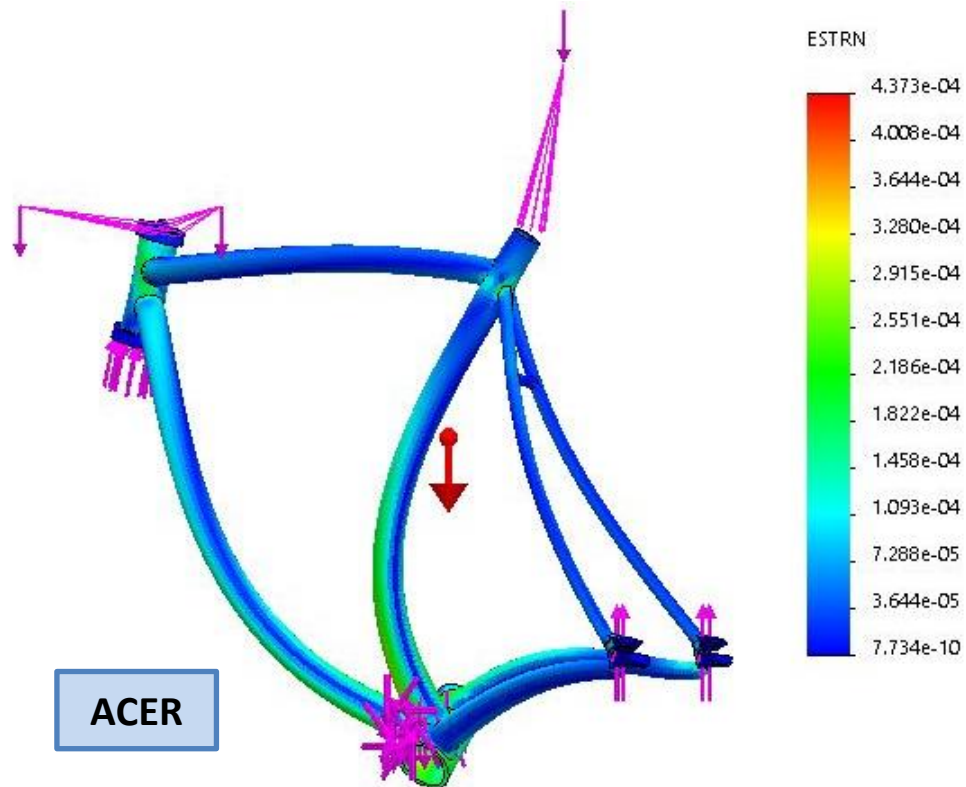


Il·lustració 69: gràfic de desplaçaments al quadre d'acer (Cas 1)

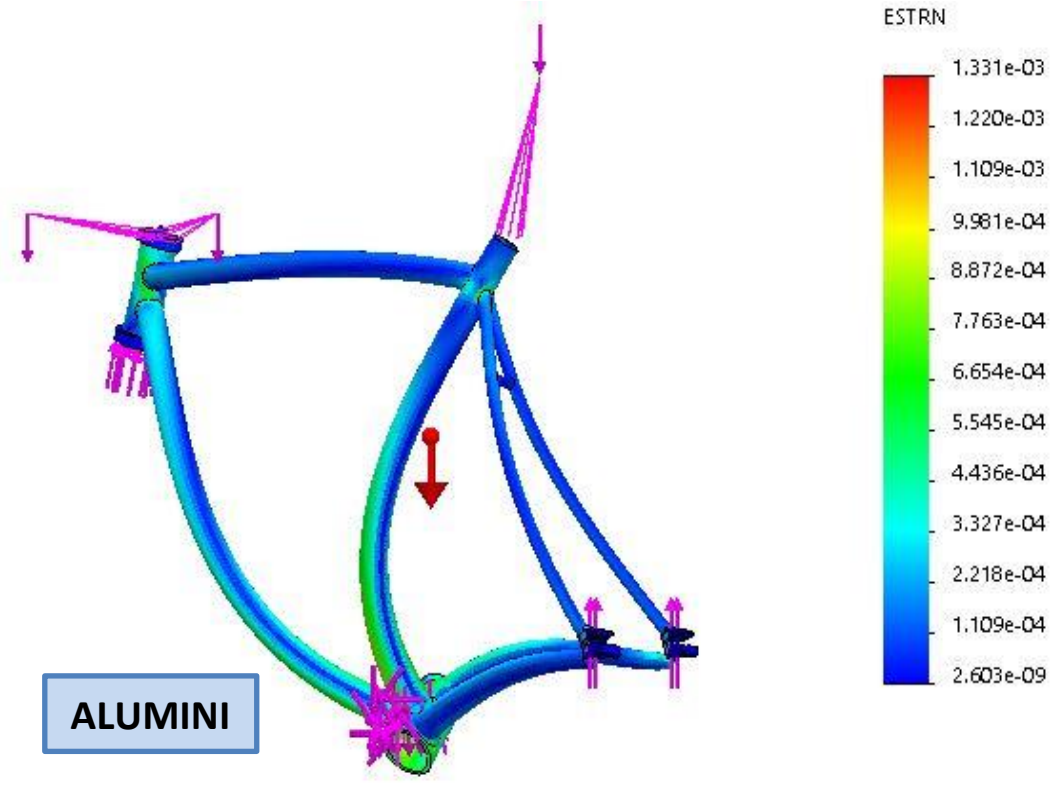


Il·lustració 70: gràfic de desplaçaments al quadre d'alumini (Cas 1)

4.1.2.3. Gràfic de deformacions unitàries

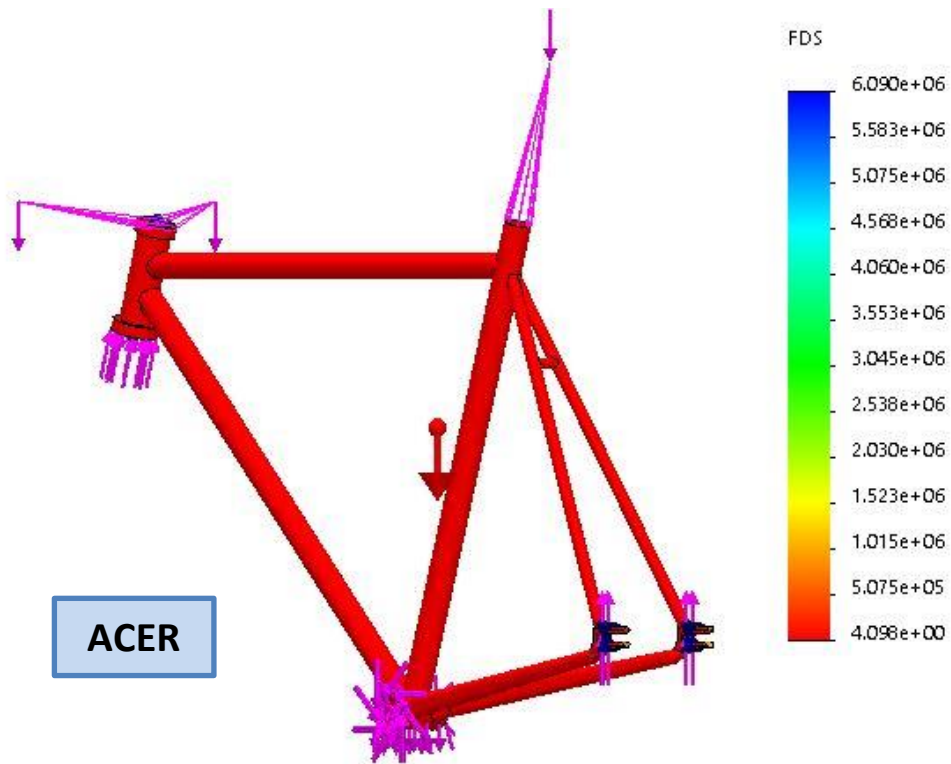


Il·lustració 71: gràfic de deformacions unitàries al quadre d'acer (Cas 1)

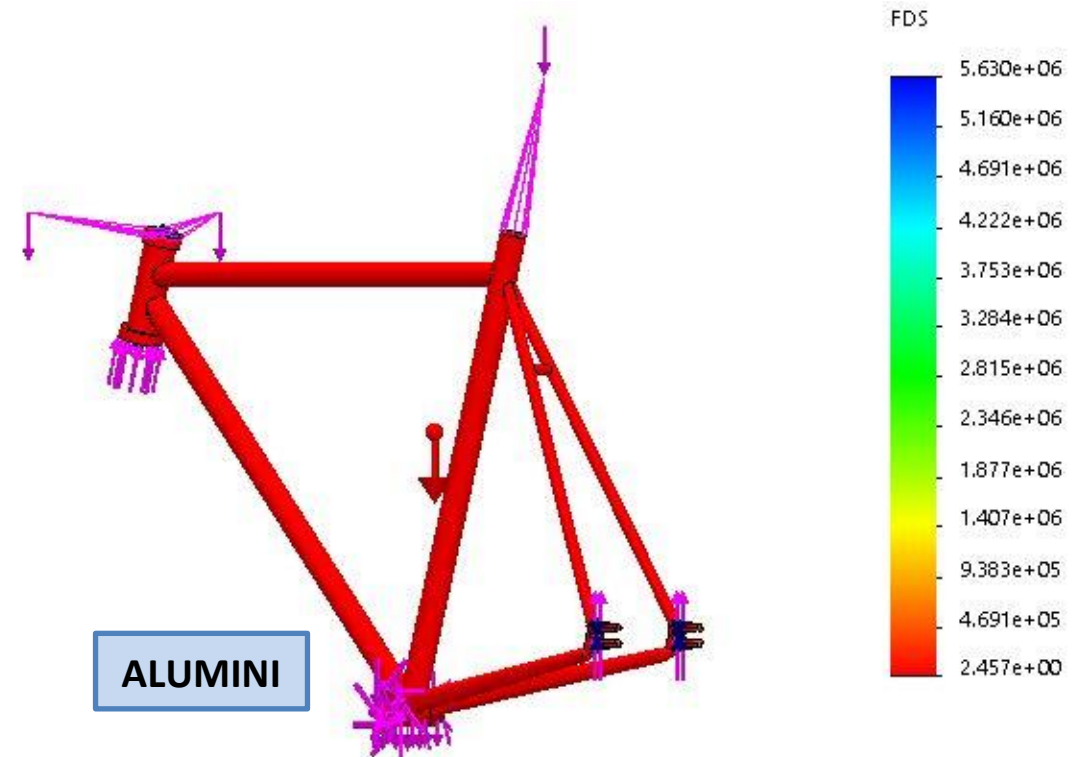


Il·lustració 72: gràfic de deformacions unitàries al quadre d'alumini (Cas 1)

4.1.2.4. Gràfic de factor de seguretat



Il·lustració 73: gràfic de factor de seguretat al quadre d'acer (Cas 1)



Il·lustració 74: gràfic de factor de seguretat al quadre d'alumini (Cas 1)

4.2. Resultats del Cas 2

4.2.1. Taula comparativa dels resultats

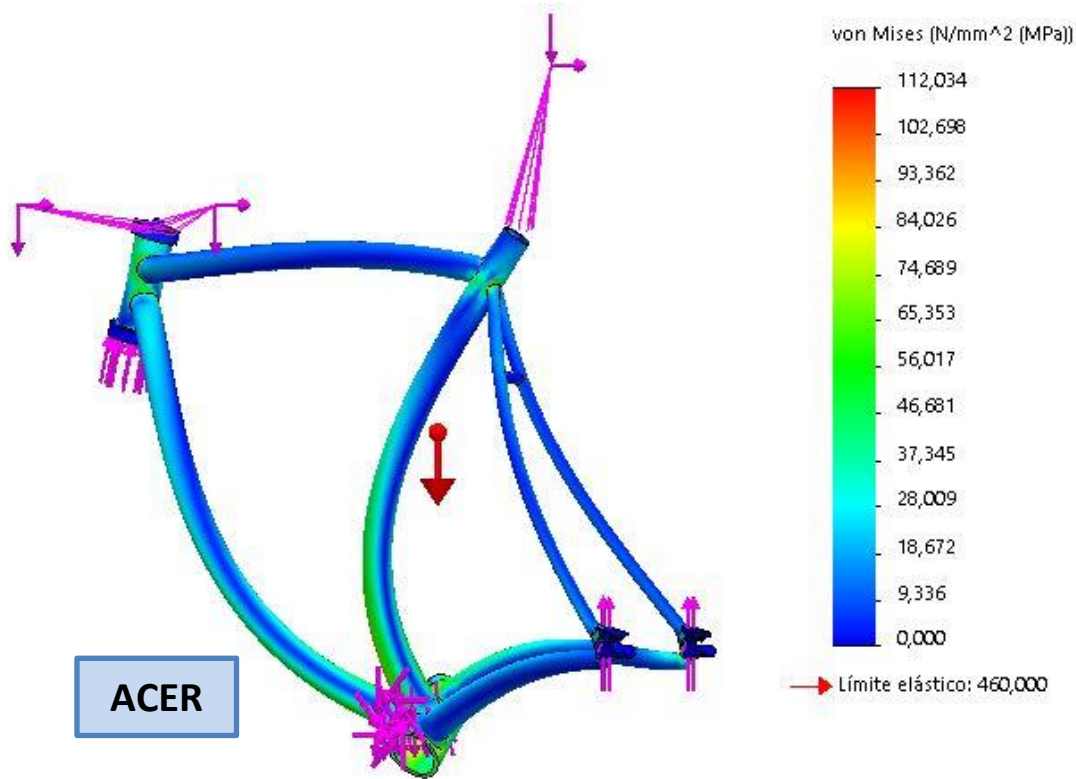
A continuació s'exposen els resultats obtinguts amb Solidworks un cop assajat el Cas 2 d'estudi. A la taula adjunta es poden observar els valors màxims de tensions, desplaçaments, deformacions unitàries i el valor mínim del Factor de seguretat.

		Resultats cas 2	
		ACER	ALUMINI
Tensions [MPa]	Màxim	112,034	111,677
Desplaçaments [mm]	Màxim	0,445	1,321
Deformacions unitàries	Màxim	$4,360 \times 10^{-4}$	$1,327 \times 10^{-3}$
Factor de seguretat	Mínim	4,106	2,462

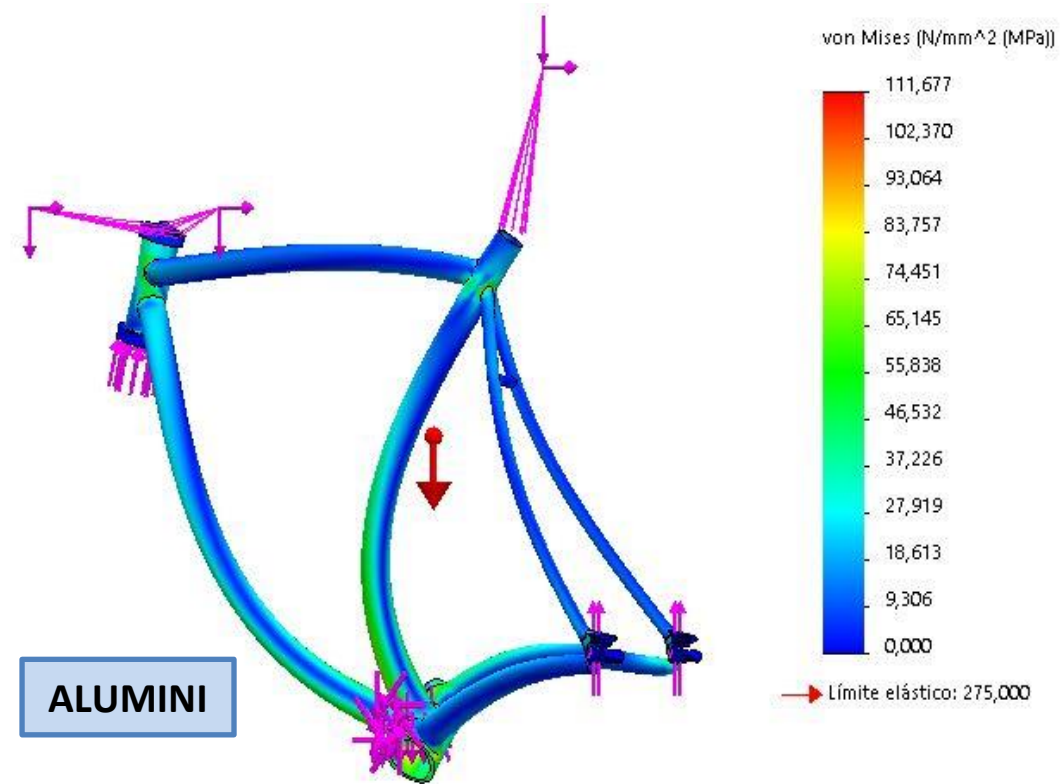
Taula 71: taula comparativa de resultats (Cas 2)

4.2.2. Gràfiques comparatives entre els dos quadres (Cas 2)

4.2.2.1. Gràfic de Tensions

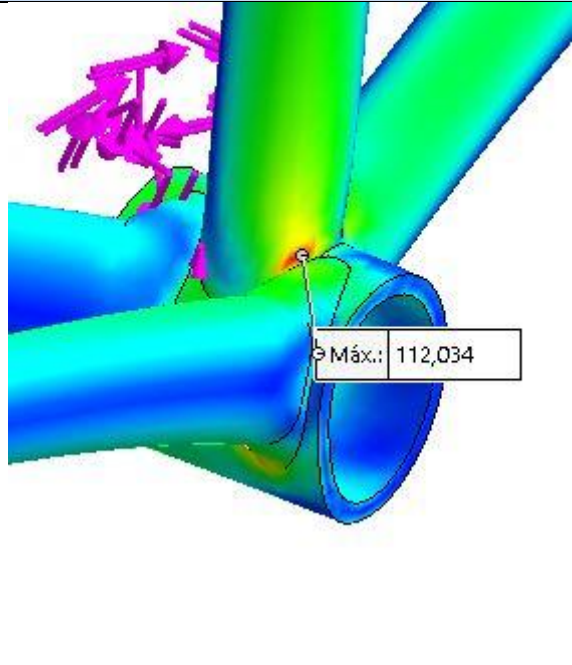
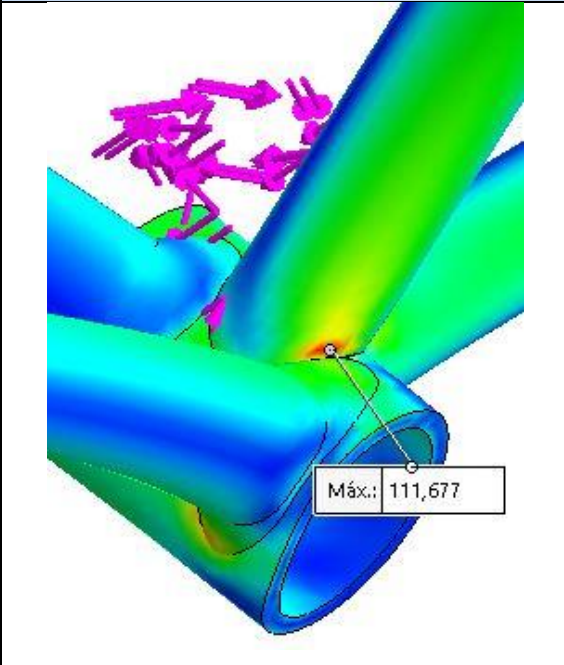


Il·lustració 75: gràfic de tensions al quadre d'acer (Cas 2)



Il·lustració 76: gràfic de tensions al quadre d'alumini (Cas 2)

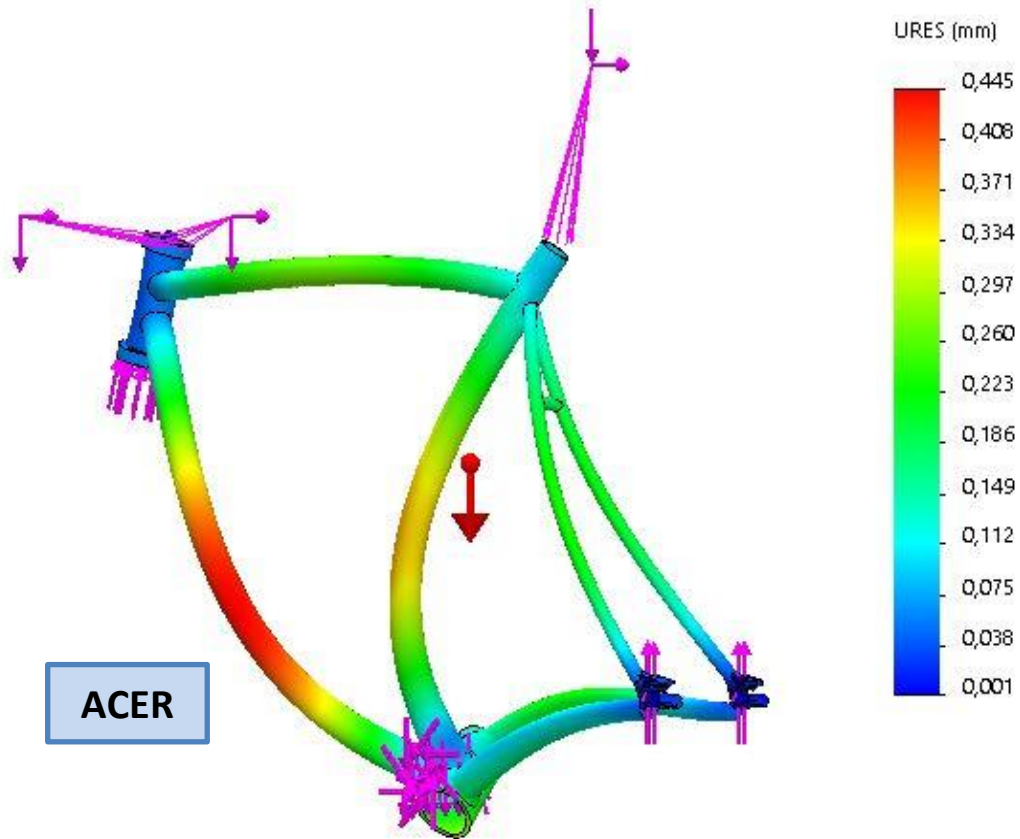
Un cop mostrades les gràfiques de tensions màximes obtingudes amb Solidworks, s'adjunta una taula on s'observa la localització de la tensió màxima obtinguda al quadre d'acer i al d'alumini.

Localització de les tensions màximes (Cas 2)	
Quadre acer	Quadre alumini
	

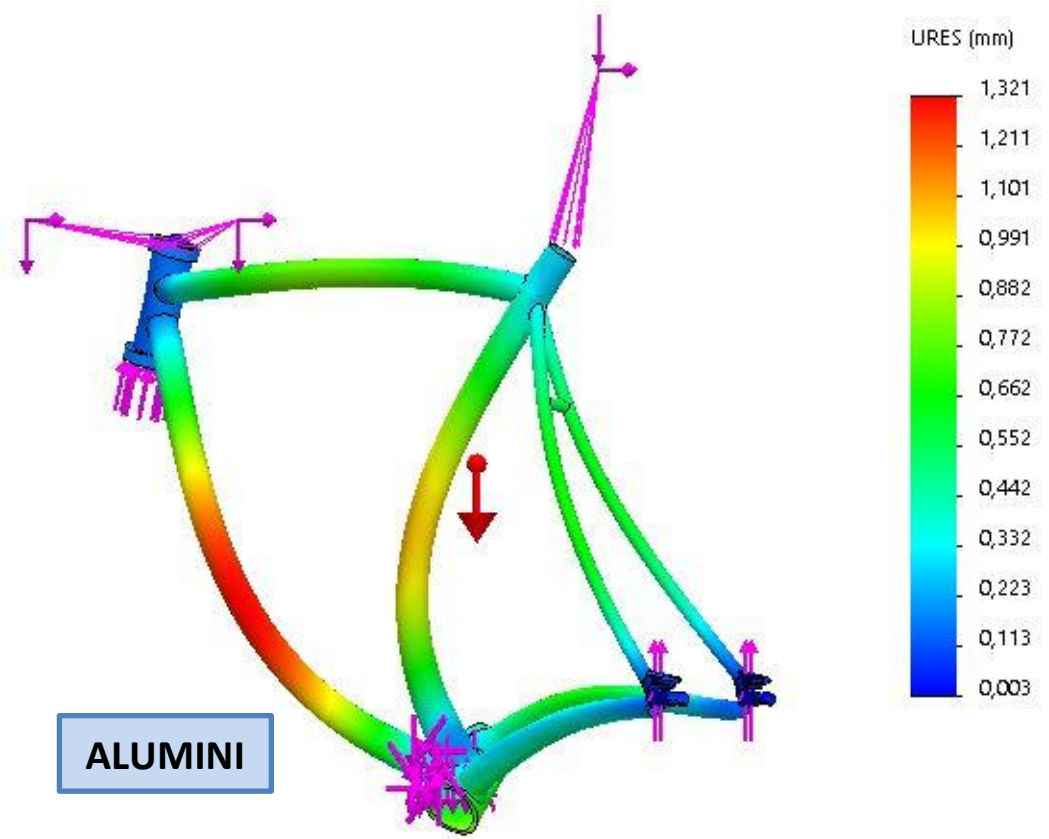
Taula 72: localització tensions màximes (Cas 2)

En aquest segon cas d'estudi, la localització de les tensions màximes al quadre es situa a la unió entre el tub del seient i el tub del pedalier, més concretament, es situa a la banda dreta del tub del seient. El motiu d'aquesta localització, es deu a que el ciclista es troba assegut al seient produint així una compressió al tub del seient i, alhora, la força de pedaleig queda aplicada al tub del pedalier juntament amb els moments deguts al pedaleig, situats a la banda esquerra del tub del pedalier. Aquest conjunt de forces i moments aplicats alhora, provoquen que la part dreta del tub del seient sigui la zona més tensionada als dos casos.

4.2.2.2. Gràfic de desplaçaments

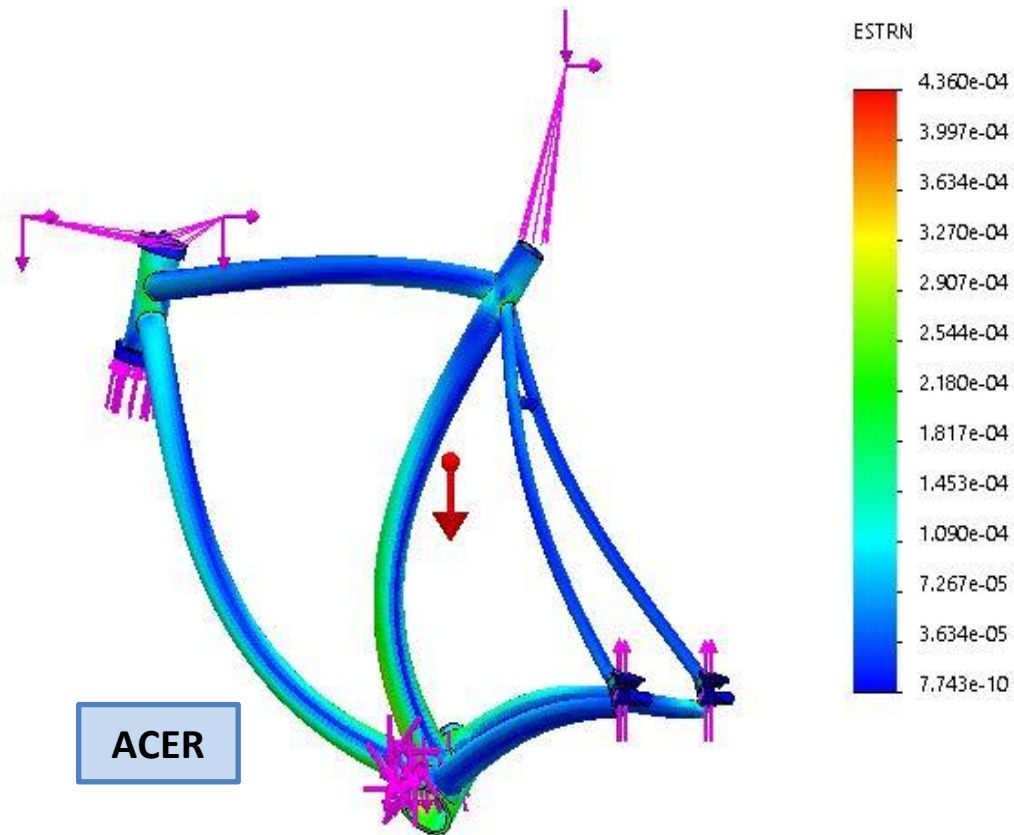


Il·lustració 77: gràfic de desplaçaments al quadre d'acer (Cas 2)

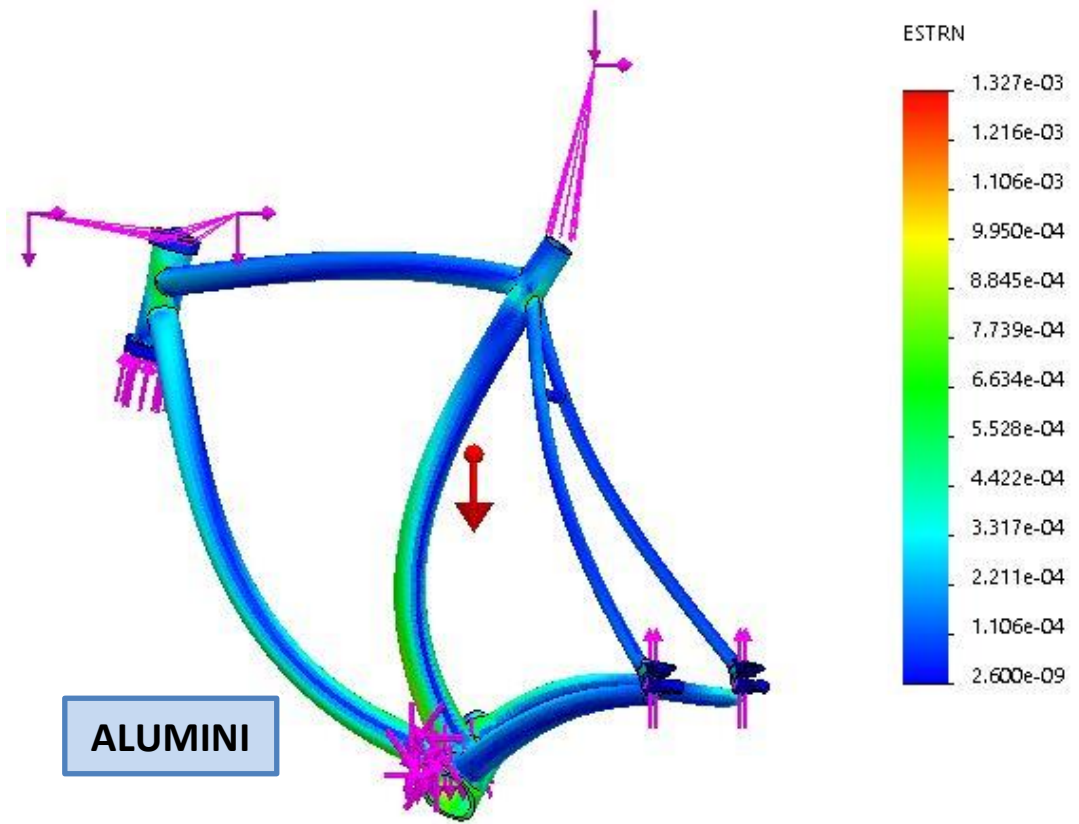


Il·lustració 78: gràfic de desplaçaments al quadre d'alumini (Cas 2)

4.2.2.3. Gràfic de deformacions unitàries

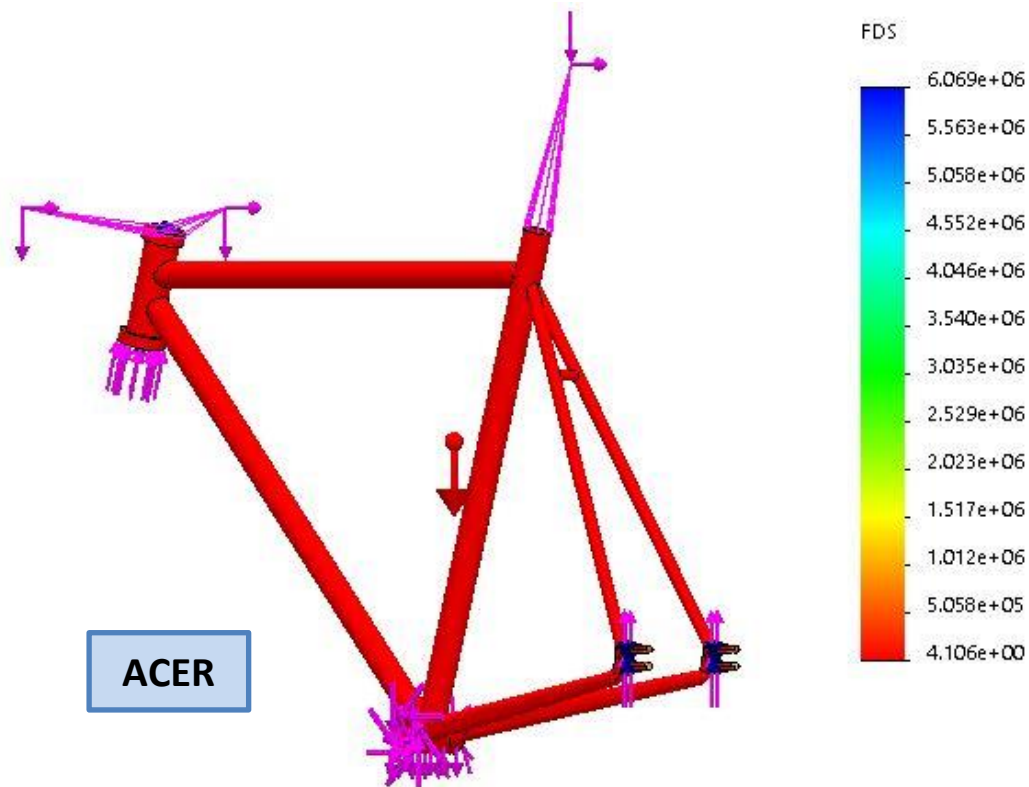


Il·lustració 79: gràfic de deformacions unitàries al quadre d'acer (Cas 2)

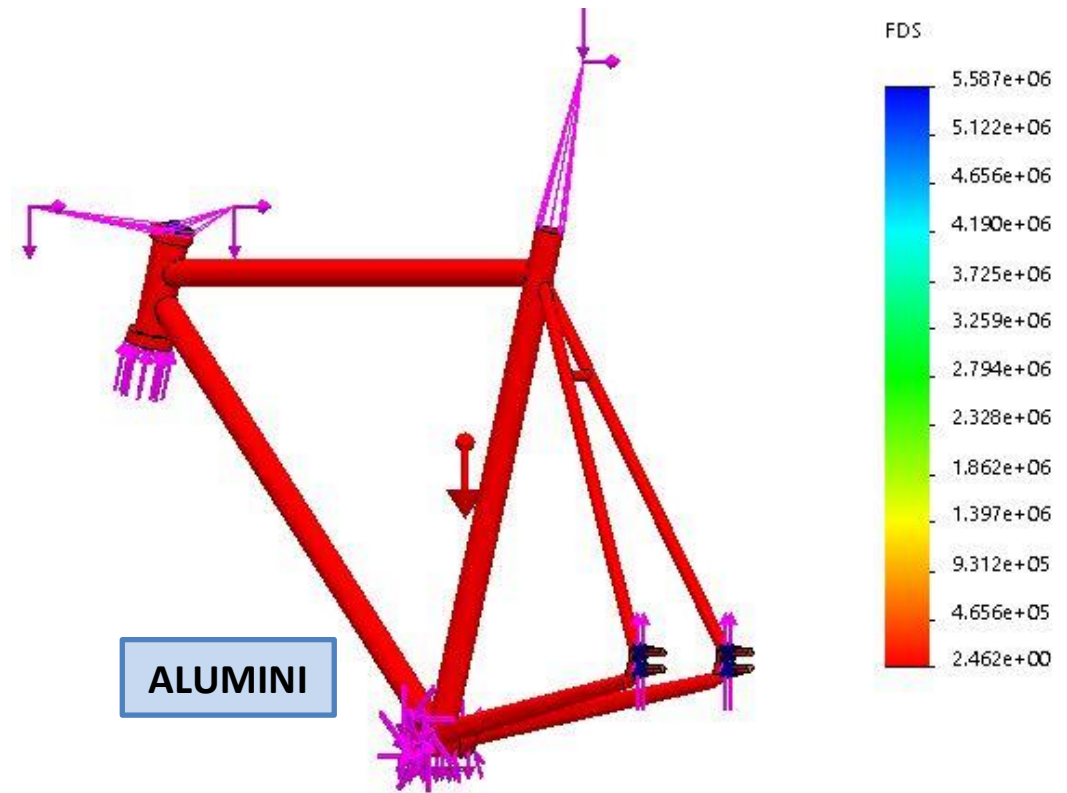


Il·lustració 80: gràfic de deformacions unitàries al quadre d'alumini (Cas 2)

4.2.2.4. Gràfic de factor de seguretat



Il·lustració 81: gràfic de factor de seguretat al quadre d'acer (Cas 2)



Il·lustració 82: gràfic de factor de seguretat al quadre d'alumini (Cas 2)

4.3. Resultats del Cas 3

4.3.1. Taula comparativa dels resultats

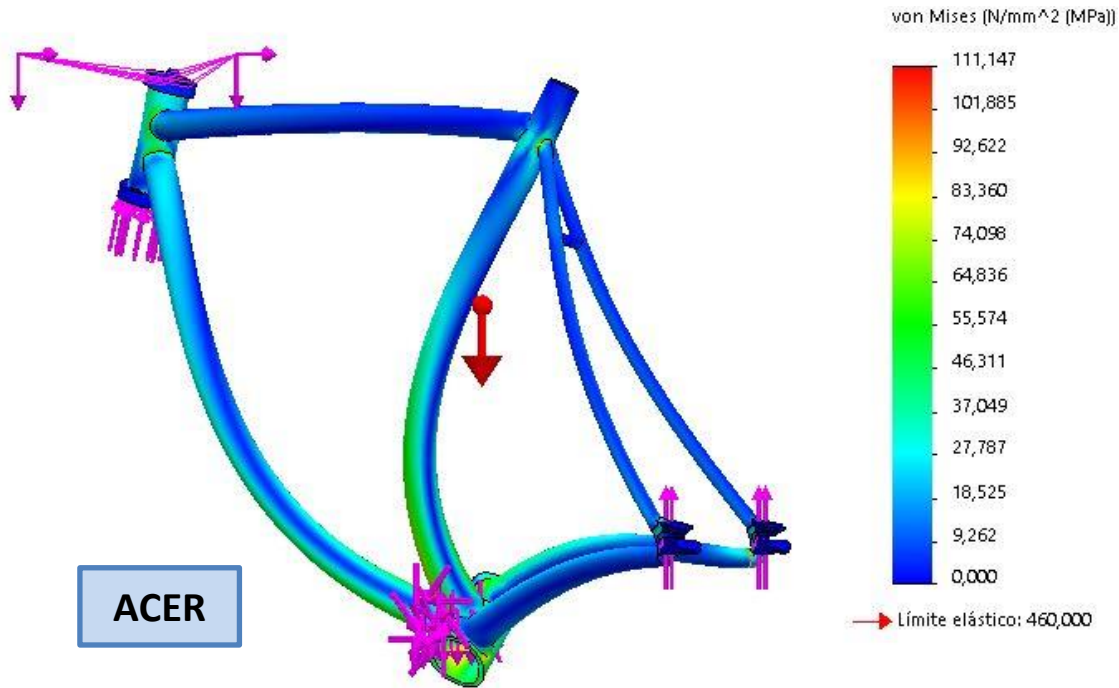
A continuació s'exposen els resultats obtinguts amb Solidworks un cop assajat el Cas 3 d'estudi. A la taula adjunta es poden observar els valors màxims de tensions, desplaçaments, deformacions unitàries i el valor mínim del Factor de seguretat.

		Resultats cas 3	
		ACER	ALUMINI
Tensions [MPa]	Màxim	111,147	112,016
Desplaçaments [mm]	Màxim	0,436	1,295
Deformacions unitàries	Màxim	$4,235 \times 10^{-4}$	$1,292 \times 10^{-3}$
Factor de seguretat	Mínim	4,139	2,455

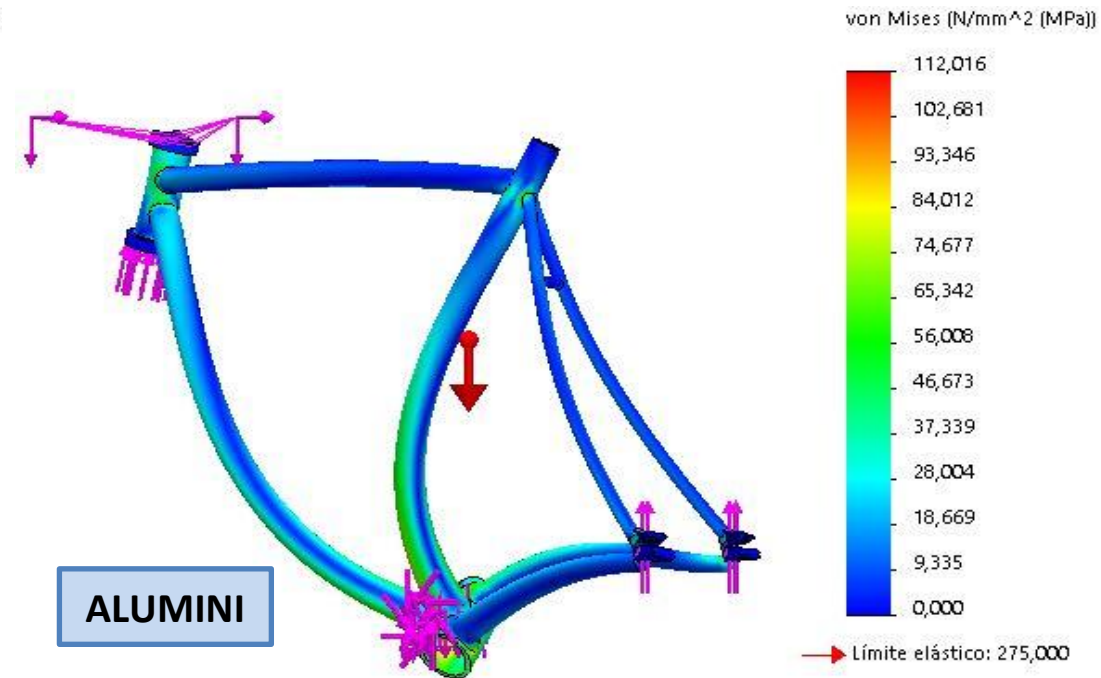
Taula 73: taula comparativa de resultats (Cas 3)

4.3.2. Gràfiques comparatives entre els dos quadres (Cas 3)

4.3.2.1. Gràfic de Tensions

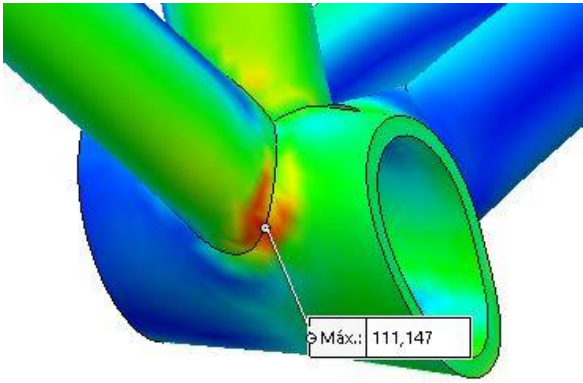
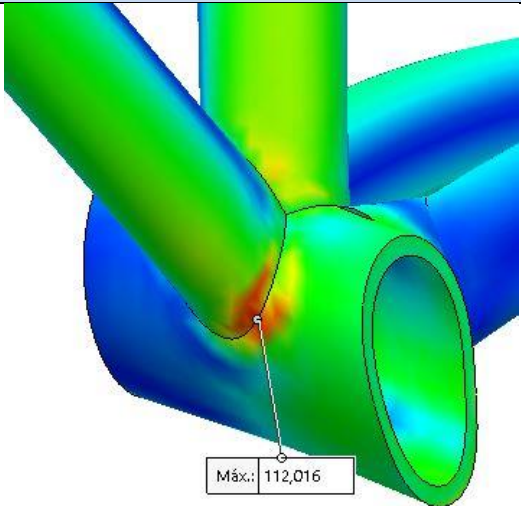


Il·lustració 83: gràfic de tensions al quadre d'acer (Cas 3)



Il·lustració 84: gràfic de tensions al quadre d'alumini (Cas 3)

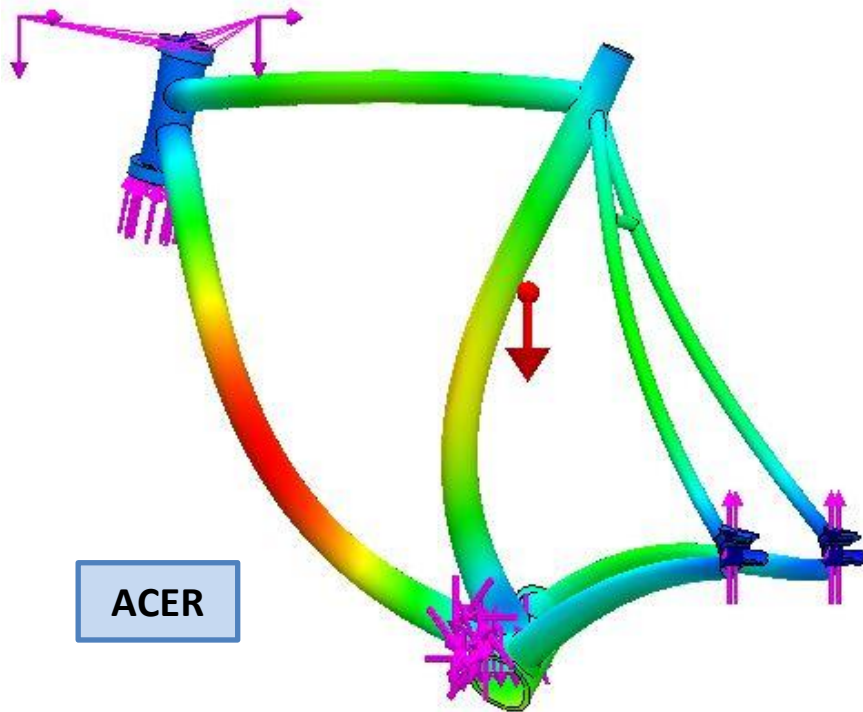
Un cop mostrades les gràfiques de tensions màximes obtingudes amb Solidworks, s'adjunta una taula on s'observa la localització de la tensió màxima obtinguda al quadre d'acer i al d'alumini.

Localització de les tensions màximes (Cas 3)	
Quadre acer	Quadre alumini
	

Taula 74: localització tensions màximes (Cas 3)

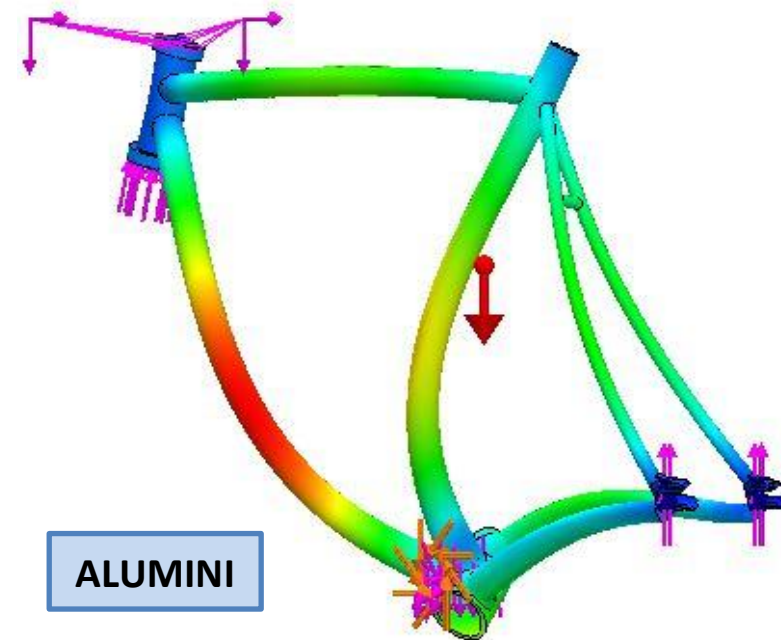
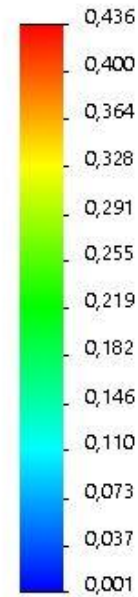
En aquest tercer cas d'estudi, les tensions màximes obtingudes es situen a la unió entre el tub inferior del quadre i el tub del pedalier. El motiu d'aquesta localització es deu a que el ciclista es troba dempeus i provoca que la càrrega aplicada al tub del pedalier i al manillar sigui superior, a comparació de les càrregues aplicades als dos primers casos. Aquest fet provoca que la deformació més gran es situï al tub inferior i que la zona amb el valor tensional més gran treballi a tracció, convertint-se així en la zona on hi podria aparèixer alguna fractura o esquerda.

4.3.2.2. Gràfic de desplaçaments



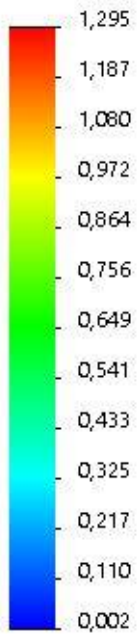
Il·lustració 85: gràfic de desplaçaments al quadre d'acer (Cas 3)

URES (mm)

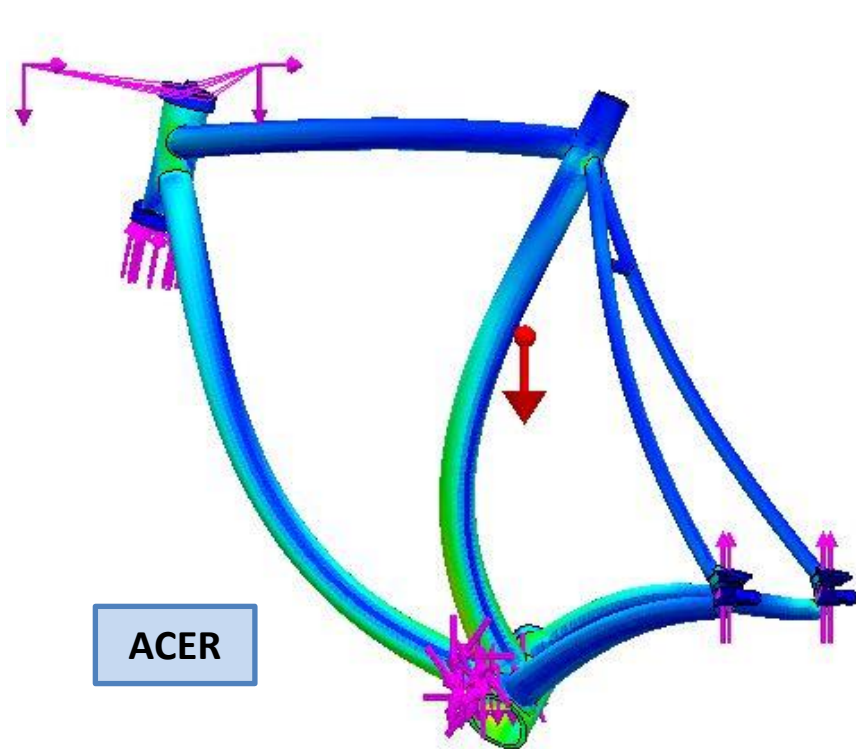


Il·lustració 86: gràfic de desplaçaments al quadre d'alumini (Cas 3)

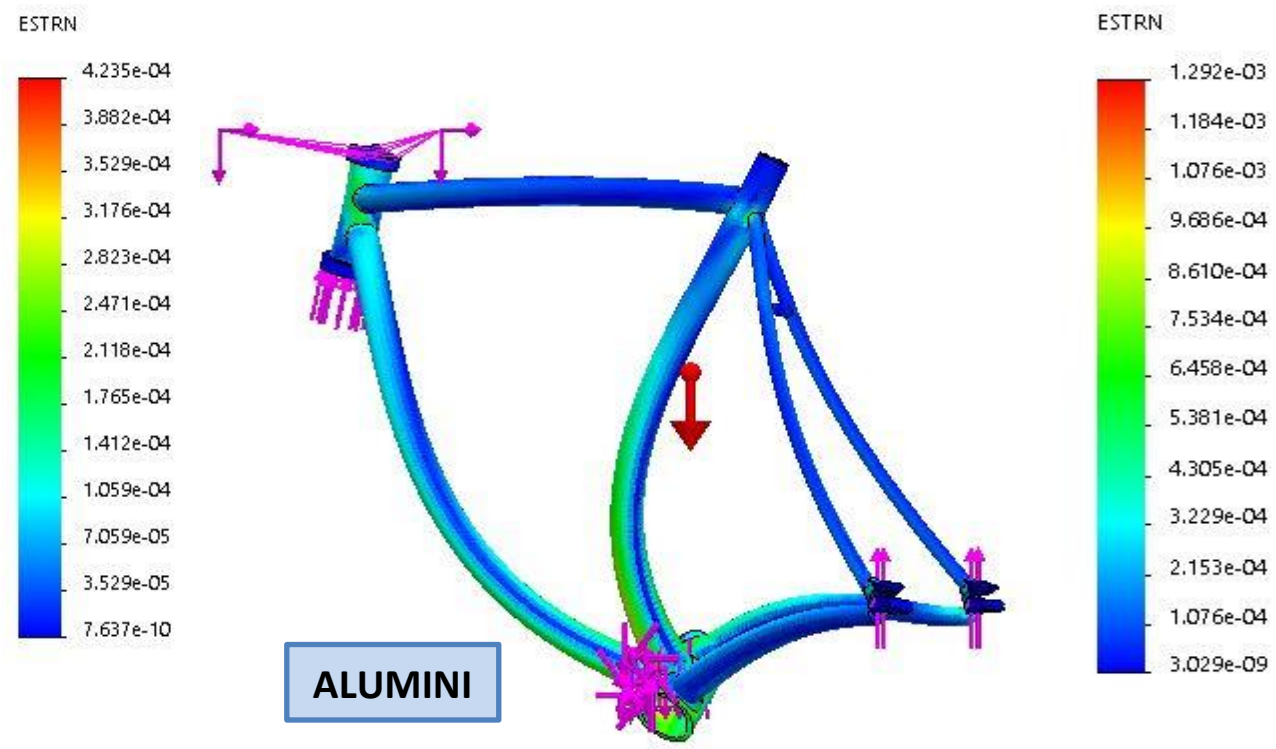
URES (mm)



4.3.2.3. Gràfic de deformacions unitàries

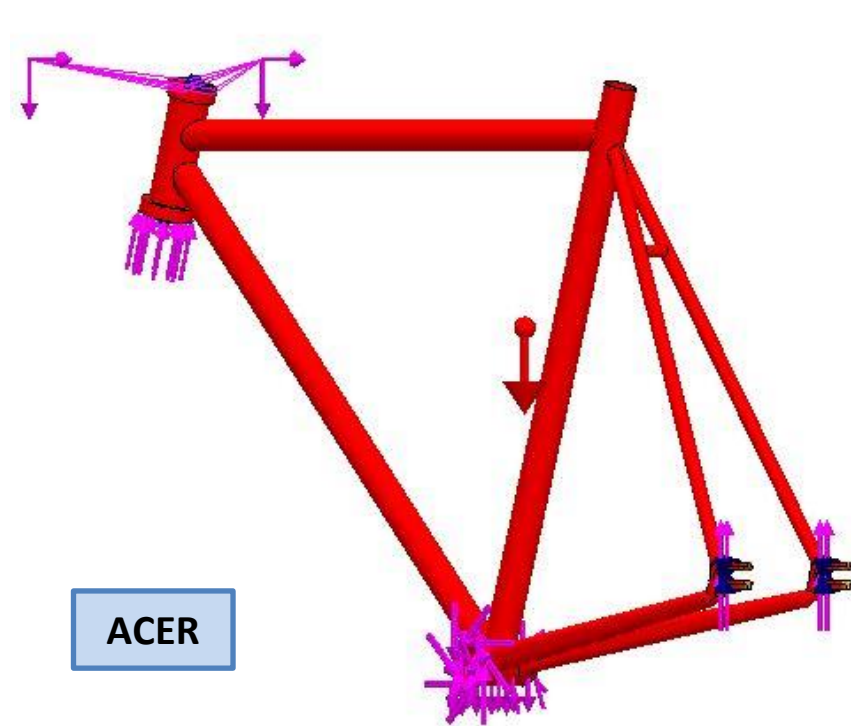


Il·lustració 87: gràfic de deformacions unitàries al quadre d'acer (Cas 3)

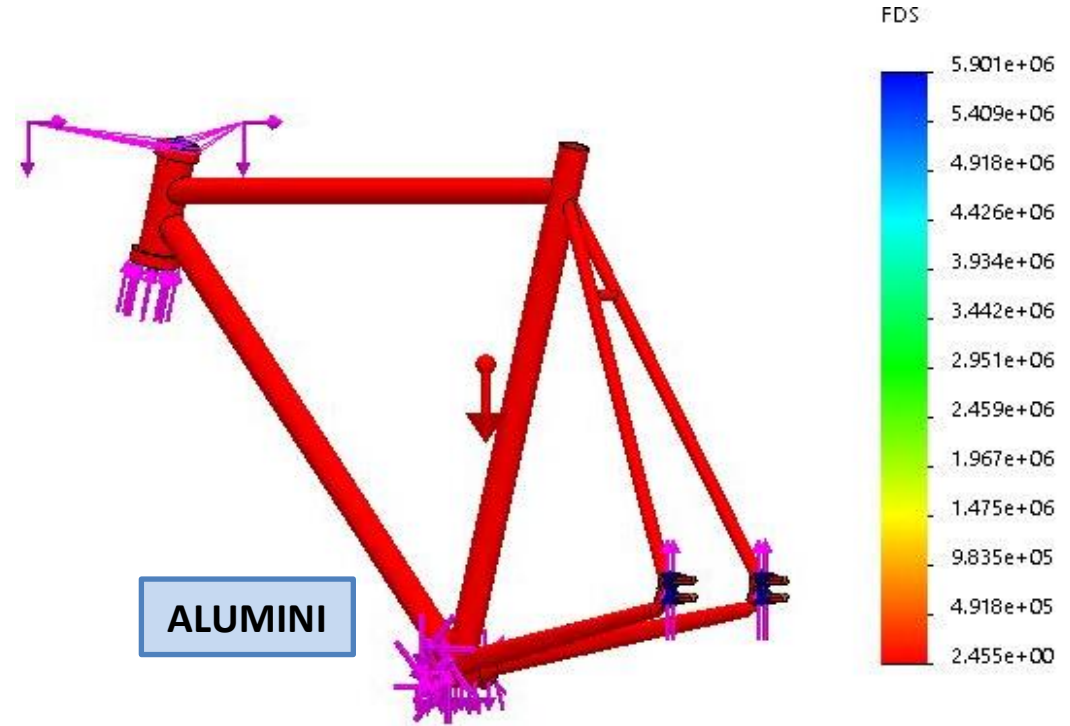
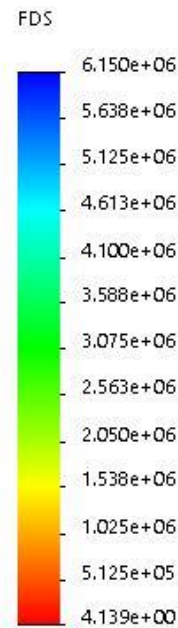


Il·lustració 88: gràfic de deformacions unitàries al quadre d'alumini (Cas 3)

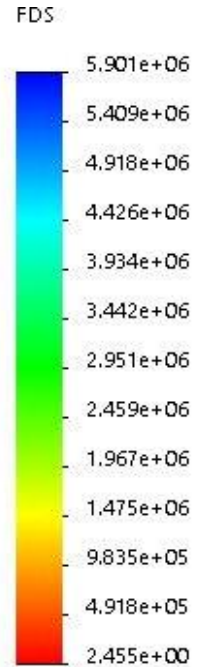
4.3.2.4. Gràfic de factor de seguretat



Il·lustració 90: gràfic de factor de seguretat al quadre d'acer (Cas 3)



Il·lustració 89: gràfic de factor de seguretat al quadre d'alumini (Cas 3)



4.4. Resultats del Cas 4

4.4.1. Taula comparativa dels resultats

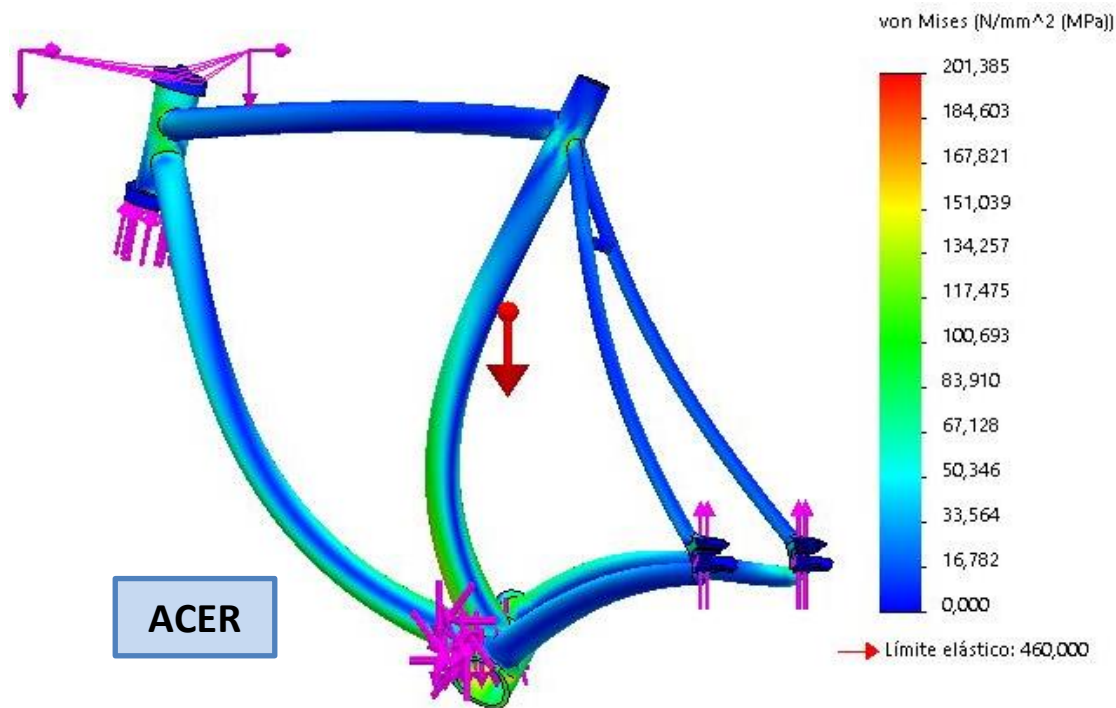
A continuació s'exposen els resultats obtinguts amb Solidworks un cop assajat el Cas 3 d'estudi. A la taula adjunta es poden observar els valors màxims de tensions, desplaçaments, deformacions unitàries i el valor mínim del Factor de seguretat.

		Resultats cas 4	
		ACER	ALUMINI
Tensions [MPa]	Màxim	201,385	203,078
Desplaçaments [mm]	Màxim	0,822	2,439
Deformacions unitàries	Màxim	$7,404 \times 10^{-4}$	$2,261 \times 10^{-3}$
Factor de seguretat	Mínim	2,284	1,354

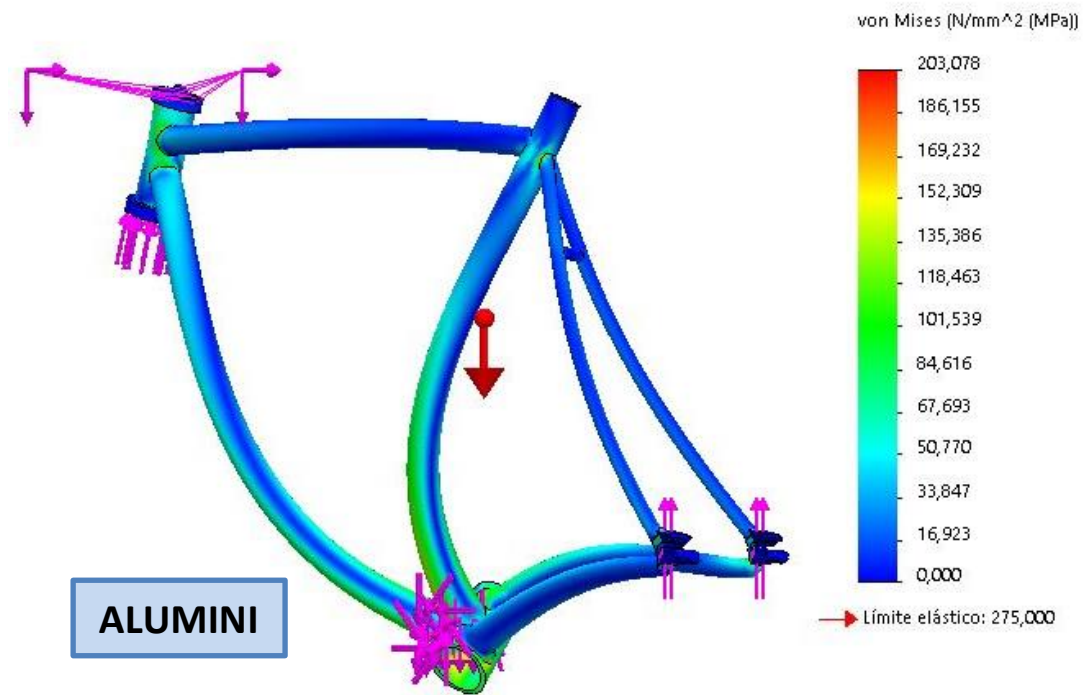
Taula 75: taula comparativa de resultats (Cas 4)

4.4.2. Gràfiques comparatives entre els dos quadres (Cas 4)

4.4.2.1. Gràfic de Tensions

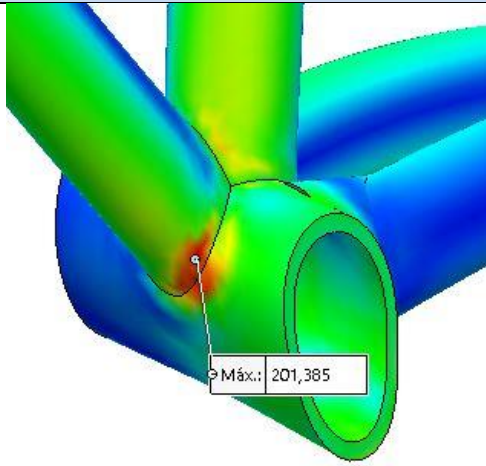
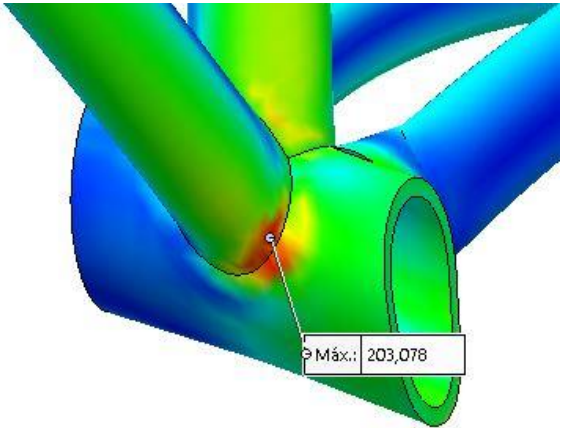


Il·lustració 91: gràfic de tensions al quadre d'acer (Cas 4)



Il·lustració 92: gràfic de tensions al quadre d'alumini (Cas 4)

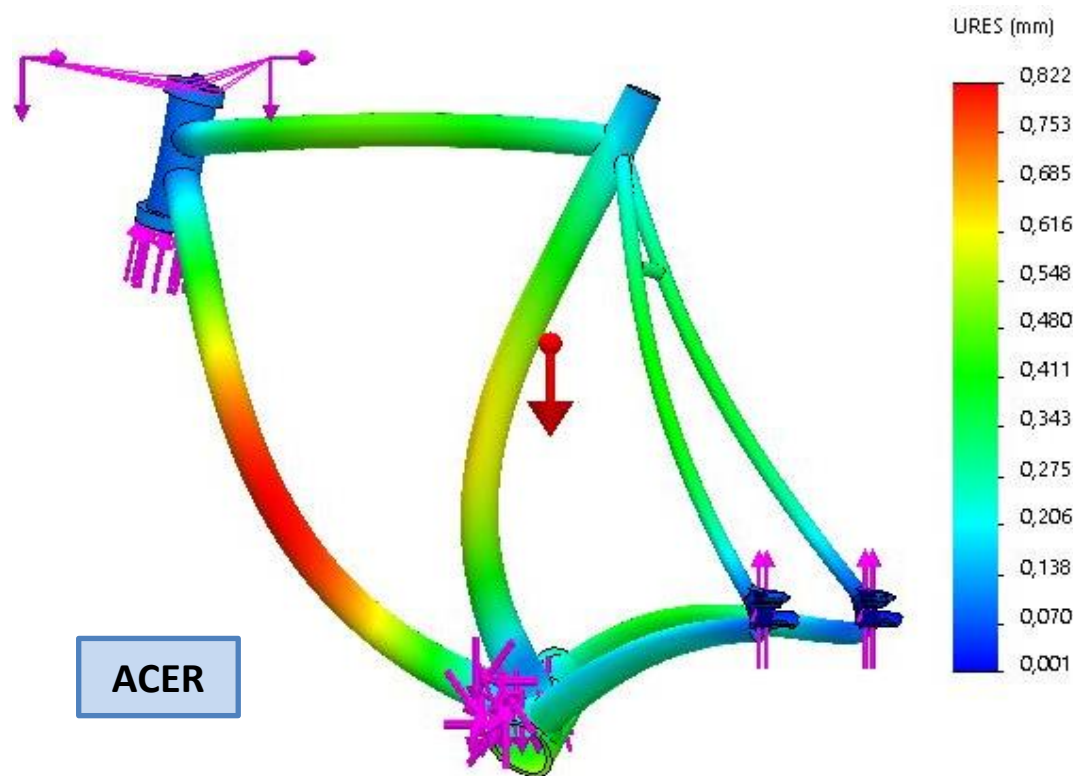
Un cop mostrades les gràfiques de tensions màximes obtingudes amb Solidworks, s'adjunta una taula on s'observa la localització de la tensió màxima obtinguda al quadre d'acer i al d'alumini.

Localització de les tensions màximes (Cas 4)	
Quadre acer	Quadre alumini
 <p>σ Máx.: 201,385</p>	 <p>σ Máx.: 203,078</p>

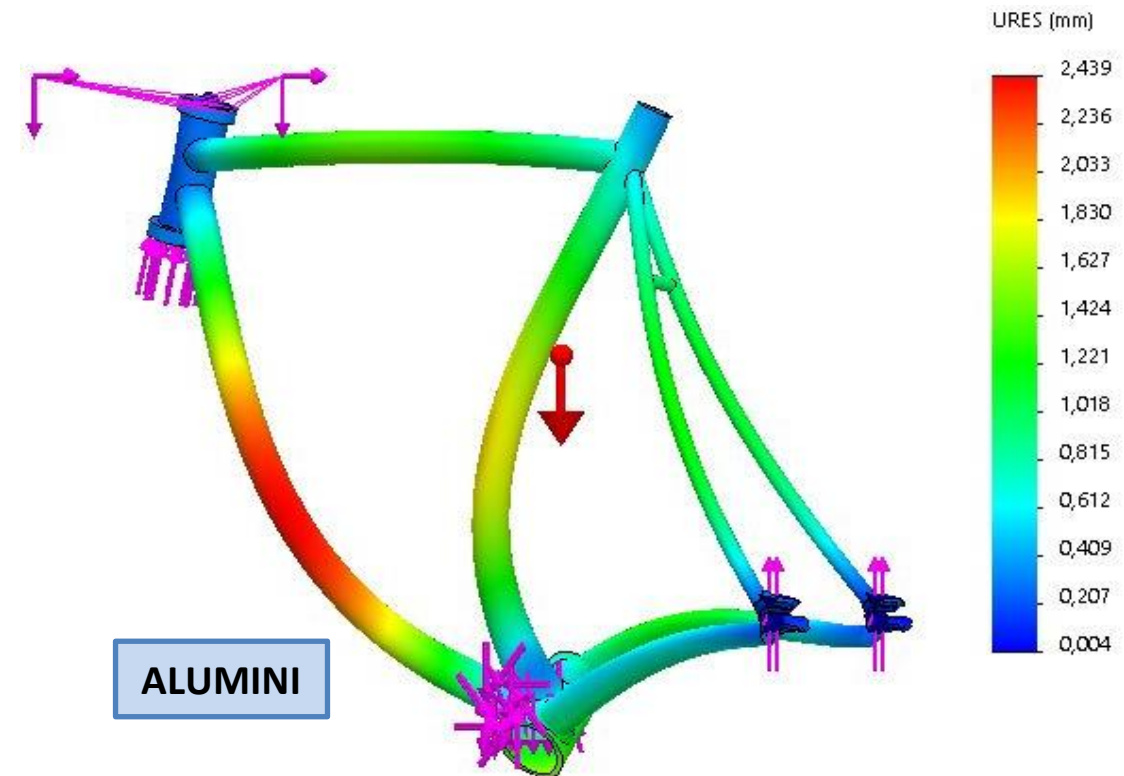
Taula 76: localització tensions màximes (Cas 4)

En aquest quart cas d'estudi, les tensions màximes obtingudes es situen a la unió entre el tub inferior del quadre i el tub del pedalier. El motiu d'aquesta localització es deu a que el ciclista es troba dempeus i provoca que la càrrega aplicada al tub del pedalier i al manillar sigui superior, a comparació de les càrregues aplicades als dos primers casos. Aquest fet provoca que la deformació més gran es situï al tub inferior i que la zona amb el valor tensional més gran treballi a tracció, convertint-se així en la zona on hi podria aparèixer alguna fractura o esquerda.

4.4.2.2. Gràfic de desplaçaments

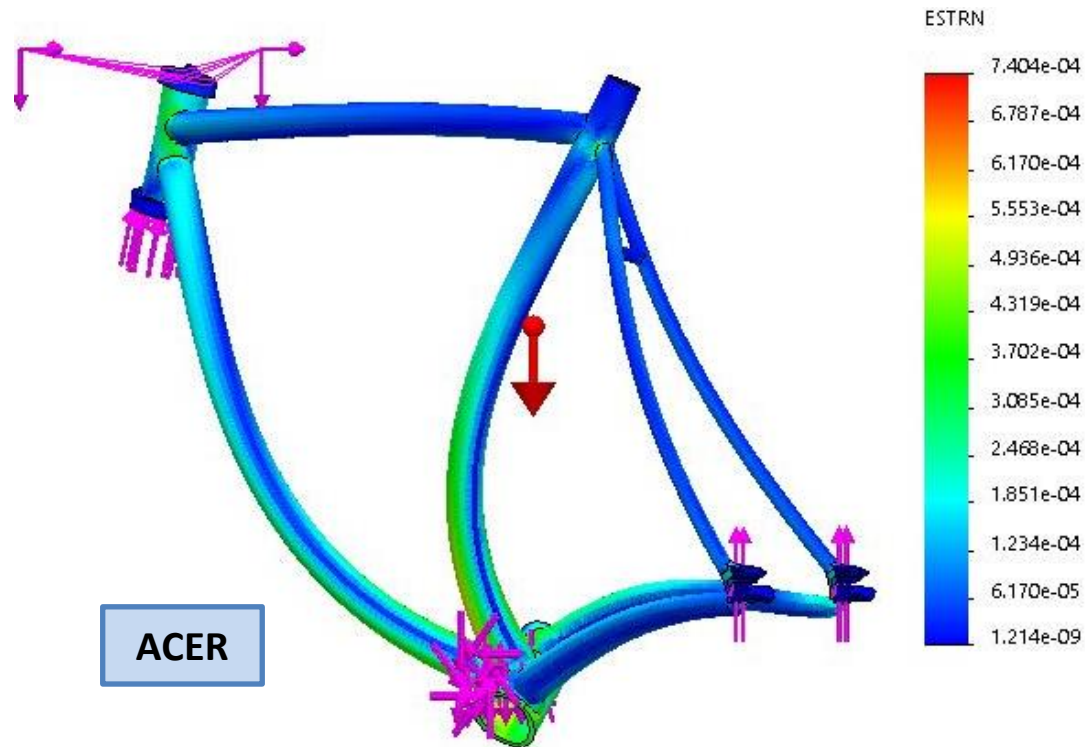


Il·lustració 93: gràfic de desplaçaments al quadre d'acer (Cas 4)

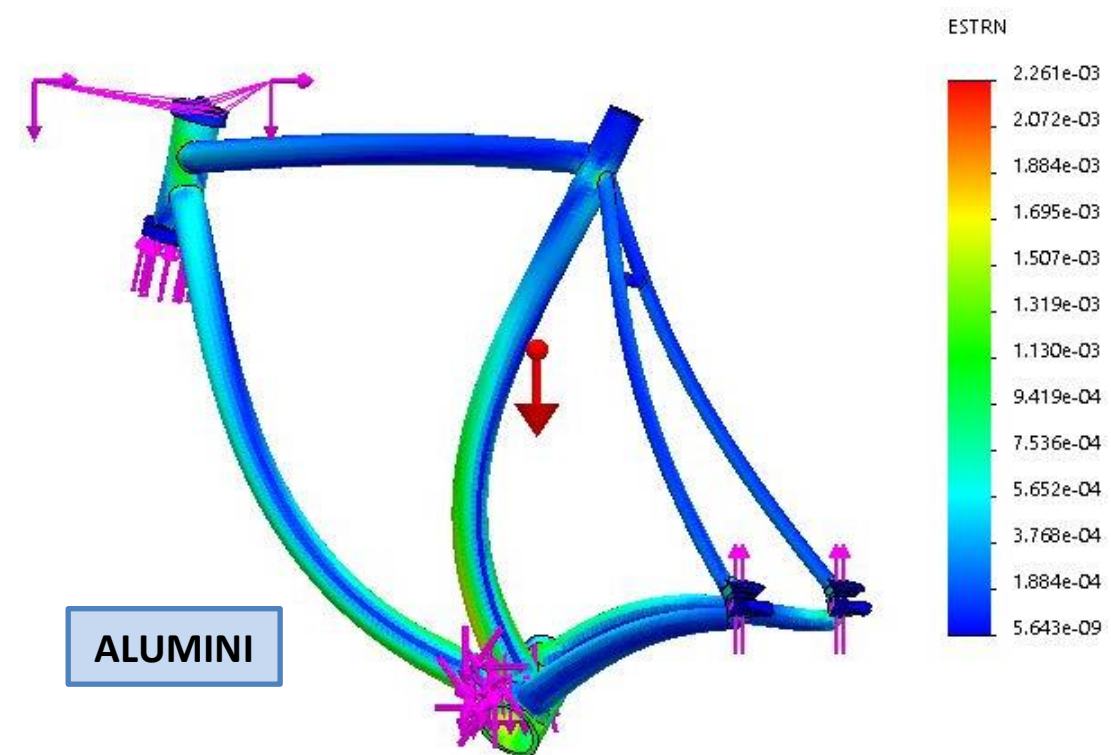


Il·lustració 94: gràfic de desplaçaments al quadre d'alumini (Cas 4)

4.4.2.3. Gràfic de deformacions unitàries

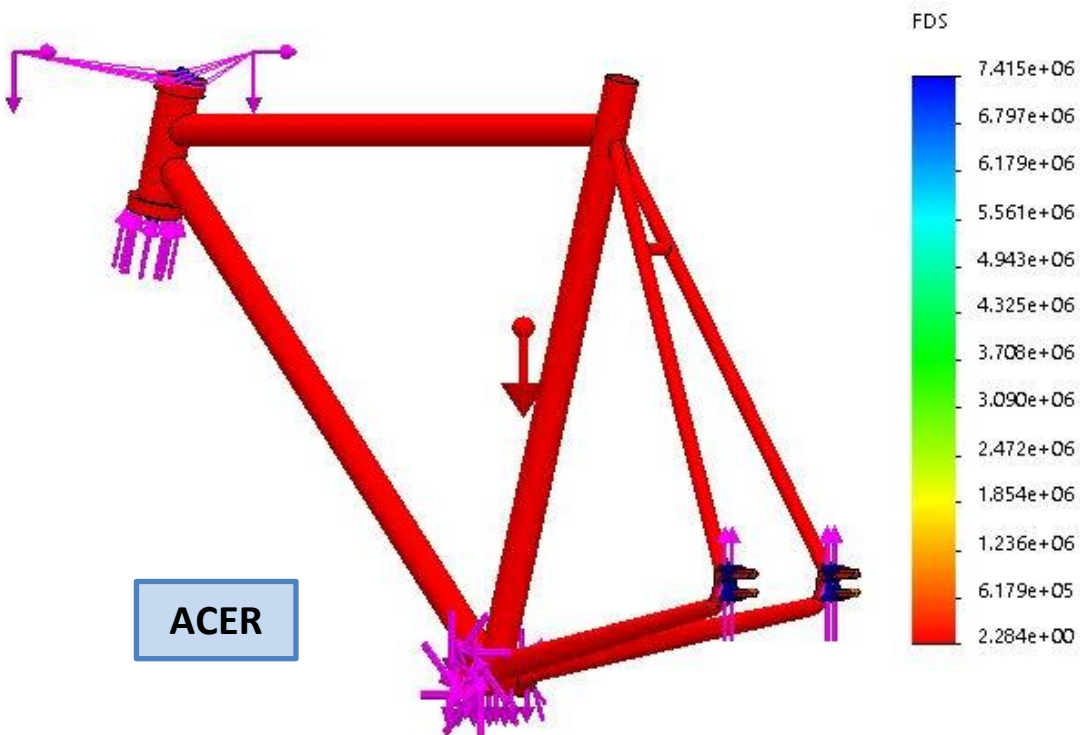


Il·lustració 96: gràfic de deformacions unitàries al quadre d'acer (Cas 4)

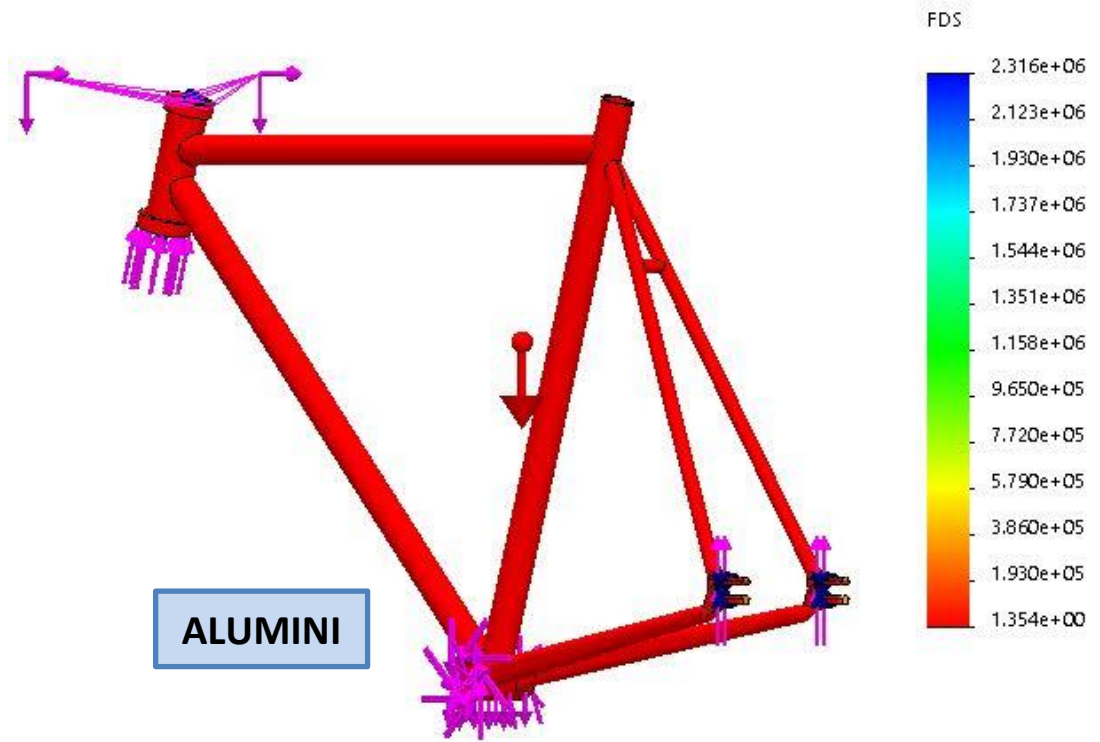


Il·lustració 95: gràfic de deformacions unitàries al quadre d'alumini (Cas 4)

4.4.2.4. Gràfic de factor de seguretat



Il·lustració 97: gràfic de factor de seguretat al quadre d'acer (Cas 4)



Il·lustració 98: gràfic de factor de seguretat al quadre d'alumini (Cas 4)

4.5. Comparativa de les tensions

A continuació s'adjunta una taula comparativa amb els resultats de les tensions a cadascun dels casos analitzats en funció del material del quadre.

Material del quadre	Taula comparativa de les tensions màximes obtingudes [MPa]			
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Acer	112,263	112,034	111,147	201,385
Alumini	111,934	111,677	112,016	203,078

Taula 77: comparativa resultats de les tensions

4.5.1. Comentaris dels resultats

Observant els resultats de les tensions màximes obtingudes a cadascun dels casos, podem determinar que els valors són molt similars entre els dos materials. En els casos 1 i 2, on el ciclista es troba assegut, s'observa que els valors més alts s'assoleixen en el cas de l'acer 4130. Per contra, en els casos 3 i 4, on el ciclista es troba dempeus, les tensions més altes ocorren en el quadre d'alumini 6061-T6.

En els casos 1, 2 i 3 s'hi aprecien unes diferències mínimes en els resultats obtinguts. Les diferències s'accentuen a l'observar els resultats del cas 4 que, tal i com s'ha especificat anteriorment, és pitjor cas d'estudi. Les tensions obtingudes al cas 4 són aproximadament el doble de grans a les obtingudes als tres primers casos d'estudi.

Tot i observar-se unes tensions similars a nivell quantitatiu, cal recordar que, degut a les propietats inherents de cadascun dels materials emprats, es treballen amb factors de seguretat clarament diferents ja que l'acer 4130 té un límit elàstic un 40% superior al límit elàstic de l'alumini 6061-T6.

4.6. Comparativa dels desplaçaments

A continuació s'adjunta una taula comparativa amb els resultats dels desplaçaments a cadascun dels casos analitzats en funció del material del quadre.

Material del quadre	Taula comparativa dels desplaçaments màxims obtinguts [mm]			
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Acer	0,443	0,445	0,436	0,822
Alumini	1,315	1,321	1,295	2,439

Taula 78: comparativa resultats dels desplaçaments

4.6.1. Comentaris dels resultats

Observant els resultats obtinguts a la taula superior, es poden veure clarament les diferències entre els dos materials. En els tres primers casos d'estudi les diferències existents entre l'acer 4130 i l'alumini 6061-T6 mantenen la proporció existent entre ells. En el cas 4 podem observar que es dupliquen els valors dels desplaçaments a comparació dels valors dels casos 1, 2 i 3.

Analitzant els dos materials sota les mateixes condicions a nivell geomètric i de càrregues, les deformacions assolides en el quadre d'alumini són tres cops superiors respecte a les deformacions de l'acer en el pitjor cas analitzat.

4.7. Comparativa de les deformacions unitàries

A continuació s'adjunta una taula comparativa amb els resultats de les deformacions unitàries a cadascun dels casos analitzats en funció del material del quadre.

Material del quadre	Taula comparativa de les deformacions unitàries màximes obtingudes			
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Acer	$4,373 \times 10^{-4}$	$4,360 \times 10^{-4}$	$4,235 \times 10^{-4}$	$7,404 \times 10^{-4}$
Alumini	$1,331 \times 10^{-3}$	$1,327 \times 10^{-3}$	$1,292 \times 10^{-3}$	$2,261 \times 10^{-3}$

Taula 79: comparativa resultats de les deformacions unitàries

4.7.1. Comentaris dels resultats

En primer lloc, abans de comentar els resultats d'aquest apartat, es defineix en què consisteix el concepte de deformació unitària.

La deformació unitària (ϵ), és la relació existent entre la deformació total i la longitud inicial del element a l'estar sotmès a esforços de tensió o compressió axial, dit d'una altra manera, és el canvi de longitud per unitat de longitud.

Un cop definit què és la deformació unitària, es comparen els resultats de les deformacions obtinguts als quatre casos d'estudi.

Els resultats obtinguts indiquen que les deformacions unitàries són superiors en el quadre d'alumini en tots els casos d'estudi, concretament, els valors obtinguts mostren que es produeixen unes deformacions de l'ordre de 3 cops superiors a les deformacions que es produeixen al quadre d'acer.

4.8. Comparativa del factor de seguretat

A continuació s'adjunta una taula comparativa amb els resultats del factor de seguretat a cadascun dels casos analitzats en funció del material del quadre.

Material del quadre	Taula comparativa dels factors de seguretat mínims obtinguts			
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Acer	4,098	4,106	4,139	2,284
Alumini	2,457	2,462	2,455	1,354

Taula 80: comparativa resultats dels factors de seguretat

4.8.1. Comentaris dels resultats

Observant els resultats obtinguts als casos d'estudi, ens mostren que, amb la geometria escollida, el quadre d'acer treballa amb un factor de seguretat més elevat que el quadre d'alumini, de l'ordre d'1,5 cops superior al factor de seguretat del alumini.

Aquests resultats, tenen una relació directa amb el límit elàstic inherent a cadascun dels materials, ja que com ha quedat mostrat a l'apartat 4.5, a nivell tensional ambdós quadres treballen amb valors molt similars.

4.9. Comentaris generals dels resultats obtinguts

A partir de les comparatives dels diferents resultats fetes als apartats anteriors, es pot determinar que en el quadre d'alumini es produeixen uns desplaçaments i unes deformacions superiors als resultats del quadre d'acer, a nivell tensional els valors són molt similars entre els dos materials, diferenciant-se en els valors del factor de seguretat, on el quadre d'acer treballa amb uns factors de seguretat superiors, de l'ordre d'1,5 cops, comparats amb l'alumini degut als límits elàstics de cadascun dels materials.

Per a més detalls dels resultats obtinguts, dirigiu-vos a l'Annex 2. En aquest mateix annex també es poden consultar les diferents comprovacions realitzades a nivell de flexions, torsions i comprovacions de les reaccions obtingudes.

5. Conclusions

Per a finalitzar aquest estudi comparatiu, s'exposen les conclusions extretes un cop analitzats els resultats obtinguts dels diferents casos. S'aprofita també per a respondre les qüestions sorgides en la fase inicial d'aquest estudi i les quals ens han dut a elaborar aquest treball.

Tal i com ha quedat explicat a l'apartat 1.5 d'aquest document, els motius que han provocat la substitució de l'acer per l'alumini no es deuen a causes com la facilitat de fabricació, ja que les propietats de l'alumini fan que tingui un grau de soldabilitat pitjor a comparació del grau de soldabilitat de l'acer. L'alumini té com a handicap la necessitat d'uns cordons de soldadura de major tamany i, després de realitzar el cordó de soldadura, s'ha de raspallar la zona soldada per a eliminar les restes d'òxid d'alumini que poden debilitar la unió soldada. Aquestes qüestions i d'altres mencionades a l'apartat d'estat de l'art, demostren que per a fabricar un quadre d'alumini s'han de prendre majors precaucions a comparació dels quadres d'acer.

Observant els resultats obtinguts al apartat 4 d'aquesta memòria, juntament amb la informació recopilada als annexos, demostren que, pel quadre estudiat, el quadre d'alumini té un pitjor comportament que el quadre d'acer degut a les diferències existents a nivell de deformacions que s'hi produeixen. Aquestes deformacions es podrien traduir amb unes pitjors sensacions a l'hora de circular amb la bicicleta i, en un cas extrem, en funció del pes del ciclista, la transmissió de la potència podria ser menys eficient a causa de ser un material més deformable. L'acer, per tant, és un material més rígid i pot transmetre unes sensacions millors a l'hora de circular amb la bicicleta i una transmissió de la potència més eficient.

Responent a l'última qüestió plantejada a l'inici de la memòria, el pes és el principal motiu que ha provocat aquest canvi en el material dels quadres. La tendència actual és alleugerir aquest component a nivells mai abans assolits i, per tant, el quadre d'acer no hi tindria cabuda en els estàndards actuals.

Finalment, la decisió d'escollir un quadre d'acer i un d'alumini idèntics, a nivell geomètric i d'espessor dels tubs, ha estat per satisfer l'objectiu principal d'aquest estudi, que és el de comparar el comportament entre els materials i no per fer un anàlisi per a l'optimització del disseny.

6. Bibliografia

- Vídeos (Youtube)
- [1] K. Liakouris, *Anàlisi MEF quadre bicicleta*. 2012.
 - [2] Cobra Framebuilding, *5 reasons why «Steel is real»*. 2019.
 - [3] Tassara Bikes, *Proceso de fabricación de un cuadro de titanio*. 2019.
-
- Llibres
- [4] V. Autores, «ATLAS ILUSTRADO DE LA BICICLETA», Madrid: SUSAETA EDICIONES, SA, 2016, p. 256.
 - [5] P. Navarro *et al.*, *La ingeniería de la bicicleta*. Madrid, 2010.
 - [6] V. Autores, *El libro de la Bicicleta*. London: DK, 2017.
-
- Enllaços Web
- [7] «Método de los elementos finitos». [En línia]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Método_de_los_elementos_finitos. [Accedit: 16-des-2019].
 - [8] «Propiedades Acero familia 4100». [En línia]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Acero_41xx.
 - [9] «Propietats del alumini i famílies d'aleacions». [En línia]. Disponible a: <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/>. [Accedit: 27-des-2019].
 - [10] «How Reynolds butted tubing is made». [En línia]. Disponible a: <https://www.reynoldstechnology.biz/materials/how-buttet-tubing-is-made/>.
 - [11] «Propietats aleacions d'alumini». [En línia]. Disponible a: www.alacermas.com. [Accedit: 27-des-2019].
 - [12] «Soldadura TIG». [En línia]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura_TIG. [Accedit: 26-des-2019].
 - [13] «Dimensions quadre de bicicleta». [En línia]. Disponible a: <https://www.statebicycle.com/pages/size-chart>.
 - [14] «Materiales cuadro de bicicleta». [En línia]. Disponible a: <https://tualum.com/blog/guia-materiales-cuadros-bicicleta/>.
 - [15] «Distribución peso corporal». [En línia]. Disponible a: <https://www.colchonescefireo.es/blog/ventajas-de-un-colchon-con-zonas-de-firmeza-diferenciada/>. [Accedit: 14-des-2019].

- [16] «Consideracions a l'hora de soldar alumini amb TIG». [En línia]. Disponible a:
<https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/que-tener-en-cuenta-al-soldar-aluminio-con-tig%0A>. [Accedit: 27-des-2019].

- [17] «Adaptative methods Solidworks». [En línia]. Disponible a:
http://help.solidworks.com/2018/spanish/SolidWorks/cworks/c_Adaptive_Methods.htm.